



Heli Mattila

Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi

Tiehallinnon selvityksiä 61/2003



Heli Mattila

Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi

Tiehallinnon selvityksiä 61/2003

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-178-9
TIEH 3200848

Verkkoversio (www.tiehallinto.fi/julkaisut)pdf
ISSN 1459-1553
ISBN 951-803-179-7
TIEH 3200848-v

Edita Prima Oy
Helsinki 2004

Julkaisua myy:
asiakaspalvelu.prima@edita.fi
puh. 020 450 011
fax. 020 450 2470



TIEHALLINTO
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 11

Heli Mattila: Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi. Helsinki 2003. Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Tiehallinnon selvityksiä 61/2003. 175 s. + liitt. 13 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-178-9, TIEH 3200848.

Asiasanat: liikenne, liikenteen hallinta, liikenteen seuranta, arviointi, mallintaminen, simulointi

Aiheluokka: 11, 25

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, mitä menetelmiä voidaan käyttää liikennetilanteen eli liikenteen sujuvuuden arviointiin, kun lähtötiedon määrä ja laatu vaihtelee. Menetelmiin perehdyttiin kirjallisuustutkimuksessa ja muutamia menetelmiä tarkasteltiin laboratorio-olosuhteissa simuloidulla liikenteellä. Liikennetilannetta kuvaavaksi suureeksi valittiin matkanopeus.

Liikenteen seurannan perustan muodostavat induktiosilmukkailmaiset, jotka tuottavat tietoa liikennemäärästä, pistenopeudesta, ajoneuvotyypistä ja ilmaisimen varausasteesta. Tiehallinnon nykyisin Internetissä antama liikennetilannetiedotus perustuu pistenopeuksiin. Pistetietojen lisäksi liikennetilanteen arvioinnissa voidaan käyttää tietoa matka-ajoista, säästä ja kelistä, mahdollisista onnettomuuksista tai tietöistä, liikennevaloista saatavia tietoja sekä historiatietoja.

Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellut menetelmät luokiteltiin pistemittausta hyödyntäviin menetelmiin, liikennevirtamalleihin, tilastollisiin menetelmiin, datafuusiomenetelmiin, mikrosimulointiin ja dynaamiseen sijoitteluun. Tarkemmin perehdyttiin pistemittauksen hyödyntämiseen ja datafuusiomenetelmiin.

Simuloitu liikenne tuotettiin Hutsim-mikrosimulointiohjelmalla. Tutkimukseen valittiin neljä eri menetelmää. Pelkkää pistenopeutta käyttäviä menetelmiä oli kaksi, joista ensimmäinen perustui linkin keskellä mitattuun ja toinen linkin päissä mitattuihin pistenopeuksiin. Lisäksi tarkasteltiin yksinkertaista jatkuvuusyhtälöön ja liikennevirran perusyhtälöön perustuvaa liikennevirtamallia ja radiaalikalantafunktio-neuroverkkoja, joiden syöteinä käytettiin pistemittaus-tietoa ja matka-aikamittausta.

Liikennevirtamalli tuotti varsin hyviä matkanopeusestimaatteja lähes kaikissa tilanteissa, mutta oli erittäin herkkä ilmaisinvirheille. Ilmaisinvirheiden vaikutuksen poistamiseksi kokeiltiin kahta eri pistemittaukseen perustuvaa tekniikkaa. Virhe korjautui kohtuullisen hyvin, kun liikennetilanne linkillä oli tarpeeksi homogeeninen.

Neuroverkot estimoivat liikennetilanteen hyvin, kun opetus on onnistunut ja syötteet valittu hyvin. Pistenopeusmallit pärjäsivät hyvin silloin, kun liikennetilanne linkillä oli homogeeninen. Kaikkien menetelmien oli vaikeinta estimoida matkanopeutta tilanteissa, joissa linkillä oli häiriö.

Luotettavien liikennetilannearvioiden saamiseksi Suomessa tarvittaisiin nykyistä tiheämpää liikenteen seurantaa. Liikennetilannearvioita voidaan kuitenkin parantaa nykyiselläkin seurantatiedolla yhdistämällä erityyppistä lähtötietoa datafuusiomenetelmillä. Asiantuntijajärjestelmien hyödyntämistä liikennetilannearvioinnissa olisi hyvä tutkia.

Heli Mattila: Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi [Realtids utvärderande av trafiksituationen på väglänkar] Helsinki 2003. Vägförvaltningen, Trafikantservice. Vägförvaltningens utredningar 61/2003. 175 s. + bilagor 13 s. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-178-9, TIEH 3200848.

Sökord: trafik, trafikledning, trafikövervakning, utvärdering, modellering, simulering

SAMMANFATTNING

Syftet med arbetet var, att undersöka de metoder som kan användas för att utvärdera trafiksituationen, dvs. trafikflödets egenskaper, då indatas kvalitet och mängd varierar. Man utförde en litteraturundersökning av de olika metoderna och en del av dem studerades också med hjälp av simulerad trafik. Reshastighet valdes till den parameter, som beskriver trafiksituationen.

Trafikövervakning grundar sig på slingdetektorer, som ger information om trafikmängd, punkthastighet, fordonstyp och detektorns belägningsgrad. Den information, som Vägverket nu ger ut via Internet grundar sig på punkthastigheter. Vid sidan in punktövervakningsdata kan också information om restider, väder och väglag, eventuella olyckor och vägarbeten, data från trafiksignalanläggningar samt historisk data användas för värdering af trafiksituationen.

De metoder, som studeras in litteraturundersökningen klassificerades i metoder, som utnyttjar punktövervakningsdata, trafikflödesmodeller, statistiska metoder, datakombineringsmetoder, mikrosimulering och dynamisk utplacering. Utnyttjandet av punktövervakning och datakombineringsmetoder studerades närmare.

Trafiken simulerades ned Hutsim mikrosimuleringsprogrammet. Fyra olika metoder valdes för undersökningen. Två metoder baserade sig enbart på punktövervakningsdata, den första på punkthastigheter mätta vid länkens mittpunkt och den andra på punkthastigheter mätta vid länkens ändor. Vidare studerades både en enkel trafikflödesmodell, som baserade sig på kontinuitetsekvation samt trafikflödets grundekvation och ett radialbasfunktionsneuronätverk med punktövervakningsdata och restidsmättningsdata som indata.

Trafikflödesmodellen producerade i nästan alla situationer rätt goda restidsutvärderingar, men var mycket sensitiv för detektorfel. För att minimera inverkan av detektorfel, utprovades två olika metoder, som grundade sig på punktövervakningsteknik. Felet rättades rätt väl ut, när trafiksituationen på länken var tillräckligt homogenisk.

Neuronätverken estimerade trafiksituationen väl, när utlärningen var lyckad och matningsvärden väl utvalda. Punkthastighetsmodellen klarade sig väl, då trafiksituationen på länken var homogenisk. Svårast för alla metoder var det att utvärdera restider i störningssituationer.

För att i Finland åstadkomma pålitliga trafiksituationsutvärderingar borde man ha mycket tätare trafikövervakning än i dagens läge. Man kan dock förbättra trafiksituationsutvärderingen på grund av befintlig data med att kombinera olika typer av indata med datakombineringsmetoder. I fortsättningen skulle det också vara värdefullt att studera användandet av expertsystem för trafiksituationsutvärdering.

Heli Mattila: Linkkikohtaisen liikennetilanteen ajantasainen arviointi. [Real-time estimation of traffic conditions on road sections] Helsinki 2003. Finnish Road Administration. Finnra Reports 61/2003. 175 p. + app. 13 p. ISSN 1457-9871, ISBN 951-803-178-9, TIEH 3200848.

Keywords: traffic, traffic management, traffic monitoring, estimation, modelling, simulation

SUMMARY

The purpose of this survey was to examine what kind of methods can be used to estimate the traffic conditions based on information from one or several data sources. The accuracy and the quantity of information were taken into account. Methods were studied in a literary research and some of them were tested using simulated data. Travel speed was chosen as a measure to describe the traffic fluency.

The most commonly used traffic monitoring method is point measurement by inductive loop detectors. They enable measurement of traffic volume, point speed, vehicle type and occupancy. Traffic fluency information given in the Internet is based on point speeds only. Travel time monitoring, knowledge about weather and road conditions, information about incidents, data from traffic signals and historical data can be used in addition to point measurement data as input for traffic fluency estimation.

The methods studied in literary research were classified in six groups: methods using only point data, traffic flow models, statistical models, data fusion, simulation and dynamic traffic assignment.

Four methods were tested with the micro simulator Hutsim. Two of the methods were based only on point speed. The first of them presumes the speed measured at the middle of the road section to describe the travel speed. The second model used point speeds measured at both ends of the road section. The third model was a simple traffic flow model, based on continuity equation and the fundamental equation of traffic flow. The fourth method was a radial basis neural network. Input data of the network included both point measurements and travel time data.

The results of traffic flow model were in general very good, but the model was very sensitive to measurement errors. Two different methods to correct the error were tested. They produced fairly good results when traffic conditions on a road section were homogenous enough.

Neural networks produce good travel speed estimates after a successful training process. Models based on point speed estimate the travel speed well when the situation on a road section is homogenous. All of the methods have difficulties to handle cases with incidents.

Reliable traffic fluency estimates require more traffic monitoring than is available today. However, based on the simulation study it can be said that even with present monitoring points, the fusion of several data sources seems to lead to a better result than just using point speeds as estimates of travel speeds. The use of expert systems in estimating the traffic fluency could be studied.

The project has been granted European Community financial support in the field of Trans-European Networks - Transport.

ESIPUHE

Tämä selvitys on tehty Traficon Oy:ssä Tiehallinnon Liikenteen palvelut -yksikön toimeksiannosta. Työ on samalla Heli Mattilan diplomityö, jonka valvojana toimi professori Tapio Luttinen Teknillisestä korkeakoulusta ja ohjaajana TkT lisäksi Kosonen (TKK). Työhön liittyvä simulointitutkimus on tehty Teknillisen korkeakoulun liikennetekniikan laboratoriossa. Traficon Oy:ssä työhön osallistuivat myös DI Jari Oinas ja DI, DE Kristian Appel. Tiehallinnossa työn kulkua ohjasi projektiryhmä, johon kuuluivat palvelupäällikkö Sami Luoma, liikenneinsinööri Timo Karhumäki ja liikenneinsinööri Jyri Vilhunen Liikenteen palvelut -yksiköstä sekä Uudenmaan tiepiirin liikenteen palvelupäällikkö Jyri Mustonen ja liikennekeskuspäällikkö Mauri Pyykönen. DI Satu Innamaa VTT:ltä toimi työssä neuvonantajana.

Tutkimuksessa on selvitetty, millaisia menetelmiä voidaan käyttää liikennetilanteen arviointiin, kun lähtötiedon määrä ja laatu vaihtelee. Menetelmiin perehdyttiin kirjallisuustutkimuksessa ja muutamaa menetelmää testattiin simuloitulla lähtötiedolla.

Hanke on kuulunut FITS-ohjelman (Finnish R&D Programme on ITS Infrastructures and Services) hankealueeseen 3 Liikenteen ja kuljetusten seuranta.

Hanke on saanut Euroopan unionin liikenteen perusrakenteen kehittämiseen tarkoitettua TEN-T (Trans-European Networks – Transport) -rahoitusta.

Helsingissä, joulukuussa 2003

Tiehallinto

Keskushallinto

Liikenteen palvelut

Sisältö

TERMIT JA KÄSITTEET	13
YLEISIMMIN KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET	15
1 JOHDANTO	16
1.1 Tutkimuksen tausta ja tarve	16
1.2 Liikennetilannetiedotuksen nykytila	17
1.3 DigiTraffic-tutkimuskonsepti	19
1.4 Liikennetilanteen arviointiin käytettävissä olevat menetelmät	20
1.4.1 Menetelmien luokittelu	20
1.4.2 Pistetietoon perustuvat menetelmät	21
1.4.3 Makroskooppiset liikennevirtamallit	22
1.4.4 Tilastolliset menetelmät	23
1.4.5 Datafuusiomenetelmät	24
1.4.6 Liikenteen simulointi	26
1.4.7 Dynaaminen liikenteen sijoittelu	28
1.5 Tutkimuksen tavoite ja sisältö	28
2 LIIKENNETIEDOT JA NIITÄ KERAÄVÄT JÄRJESTELMÄT	31
2.1 Erimuotoiset liikennetiedot	31
2.2 Pisteseuranta	31
2.2.1 Liikenteen automaattinen mittaus (LAM)	31
2.2.2 Liikennevaloista saatavat tiedot	32
2.3 Tieosaseuranta	33
2.3.1 Matka-aikaseurannan erityispiirteet	33
2.3.2 Rekisterikilpien tunnistamiseen perustuva matka-aikaseuranta	34
2.3.3 Matkapuhelinpaikannukseen perustuva matka-aikaseuranta	35
2.4 Muut tiedot	36
2.4.1 Väyläohjausjärjestelmistä saatavat tiedot	36

2.4.2	Sää- ja kelitiedot	37
2.4.3	Tietyöt ja häiriöt	37
3	LIIKENNETILANTEEN ARVIOINTIIN SOVELTUVAT MENETELMÄT	38
3.1	Pistetietoon perustuvat menetelmät	38
3.1.1	Pistetiedon ominaisuuksia	38
3.1.2	Pistetiedon yleistäminen tiejaksolle – Gardermoen	40
3.1.3	Matka-ajan arvioiminen pistemittaustiedon avulla	43
3.2	Yksinkertainen makroskooppinen liikennevirtamalli	46
3.3	Datafuusiomenetelmät	51
3.3.1	Bayesilainen ja Dempster-Shafer -päättely	51
3.3.2	Dempster-Shafer -päättelyn käyttö ruuhkautuneisuuden määrittämisessä	53
3.3.3	Sumea logiikka	55
3.3.4	Neuroverkot	56
3.3.5	Matka-ajan estimoiminen neuroverkkojen avulla	58
3.3.6	Matka-ajan arviointi liikennevaloympäristössä neuroverkkojen ja sumean logiikan avulla	60
3.3.7	Liikennetiheysestimaatin korjaaminen sumean logiikan ja neuroverkkojen avulla	61
3.3.8	Kalman-suodin	64
3.3.9	Mittaustietojen yhdistäminen liikennevirtamalliin Kalman-suotimen avulla	65
4	TUTKIMUSMENETELMÄ	70
4.1	Simulointitutkimukseen valitut menetelmät	70
4.1.1	Menetelmien valinta kirjallisuustutkimuksen perusteella	70
4.1.2	Nykytilamalli: Yhden mittauspisteen menetelmä	71
4.1.3	Kahden mittauspisteen menetelmä	71
4.1.4	Yksinkertainen liikennevirtamalli	72
4.1.5	Radiaalikantafunktioneuroverkko (RBF)	73
4.2	Simulointi tutkimusmenetelmänä	76
4.3	Hutsim-simulointiohjelman mallinnusperiaatteet	76

4.4	Hutsim- ja Matlab-ohjelmien käyttö tutkimuksessa	76
4.5	Todellisen matkanopeuden määritelmä	78
4.6	Simulointitutkimuksessa toteutunut matkanopeus	78
4.7	Koeasetelma	81
4.7.1	Koealue	81
4.7.2	Ilmaisinsijoittelu	82
4.7.3	Liikennemäärät ja lähtöpaikka-määräpaikkajakaumat	83
4.7.4	Simulointikokeessa tutkittavat tapaukset	89
4.8	Liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien toteutus	90
4.9	Liikennevirtamalliin kumuloituvan virheen korjaaminen	91
4.9.1	Ehdot korjauksen toteuttamiseen	91
4.9.2	Korjaus varausasteen perusteella laskettuun liikennetiheyteen	92
4.9.3	Korjaus vapaan virran matka-aikana havaittujen ajoneuvojen perusteella	92
4.10	Neuroverkkojen opetus	93
5	SIMULOINTITULOKSET	95
5.1	Tulosten käsittely	95
5.2	Liikennevirtamallin simulointitulokset	96
5.2.1	Liikennemäärän muutoksen vaikutus	96
5.2.2	Häiriötilanteet	104
5.2.3	Ilmaisinvirheet	112
5.2.4	Liikennetiheyden alkuarvo ja arvioiminen varausasteen perusteella	116
5.2.5	Liikennevirtamallin kumuloituvan virheen korjaaminen	120
5.2.6	Linkin pituus	125
5.3	Neuroverkkojen tulokset	127
5.3.1	Liikennemäärän muutoksen vaikutus	127
5.3.2	Häiriötilanteet	131
5.3.3	Ilmaisinvirheet	139
5.4	Tulosten vertailu soluautomaattimalliin	142

6	MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE	144
6.1	Tiejakson ominaisuudet	144
6.2	Laitteet ja kustannukset eri seurantavaihtoehdoilla	145
6.3	Eri vaihtoehtojen edut ja rajoitukset	155
7	PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET	157
7.1	Yleistä	157
7.2	Pistenopeuteen perustuvat menetelmät	159
7.3	Liikennevirtamalli	160
7.4	RBF-neuroverkko	162
7.5	Yhteys lyhyen aikavälin ennusteisiin	164
7.6	Eri liikennetilanteet	165
7.7	Liikenteen seurannan ja liikennetilannetiedotuksen kehittäminen Suomessa	165
7.8	Jatkotutkimusaiheet	168
	LÄHDELUETTELO	171
	LIITTEET	176

TERMIT JA KÄSITTEET

aikajakso/tarkasteluaikajakso/laskentajakso:
aika, jonka välein (liikenne)tilannetta tarkastellaan

häiriö:
poikkeuksellinen ja ennalta arvaamaton liikennetilanne, joka haittaa liikennettä (myös onnettomuus)

liikennetiedot:
tiedot vallitsevista tai ennustetuista liikenneoloista

liikennetiedotus:
tienkäyttäjille jaettava tieto vallitsevista liikenneoloista

liikennetilannetiedot, sujuvuustieto:
tiedot vallitsevasta liikennetilanteesta / liikenteen sujuvuudesta

linkki:
määritelty tässä työssä (pää)liittymävälinä, käytetään yleisesti myös esim. kahden mittauspisteen välisestä tieosuudesta

matka-ajan arviointi, matka-ajan estimointi:
määrätyn tiejakson kokonaismatka-ajan arviointi

matka-aika:
kokonaismatka-aika lähtöpaikasta määräpaikkaan

matka-ajan seuranta:
tiedon keruu matka-ajoista

matkanopeus, tieosanopeus:
tieosan pituuden ja ajoneuvojen tieosaan käyttämän kokonaismatka-ajan osamäärä

pistenopeus:
ajoneuvon hetkellinen nopeus tietyssä tien kohdassa

pisteseuranta:
liikenteen tai muiden ominaisuuksien seuranta tietyssä tien kohdassa

seurantajakso:
tietty tiejakso, jonka liikenneoloja seurataan

tiejakso, tieosa:
tietty tiejakso kahden päätepisteen välillä, voi käsittää yhden tai useamman liittymävälin

tieosa(kohtainen) seuranta:
liikenteen tai muiden ominaisuuksien seuranta määritellyllä tieosalla

värikoodattu kartta:

kartta, jolla esitetään liikennetilanne ajosuunnittain eri värien ja symbolien avulla

YLEISIMMIN KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

v	nopeus, km/h
q	liikennemäärä, ajon/h
k, ρ	liikennetiheys, ajon/km
t	aika, s tai h
x	paikka, m tai km
T	matka-aika, s tai h
v_f	vapaa nopeus
Δt	aikaväli, s
T_f	vapaan liikennevirran matka-aika, s tai h
o	ilmaisimen varausaste
x_1	ylävirran mittauspisteen paikka
x_2	alavirran mittauspisteen paikka
I	kaistojen lukumäärä
LVM	liikennevirtamalli
RBF	radiaalikantafunktioneuroverkko
PN1	yhden mittauspisteen menetelmä
PN2	kahden mittauspisteen menetelmä
TN	toteutunut nopeus

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tarve

Laadukkaiden liikenteen hallinnan palveluiden kehittämisen suurimpana haasteena on liikennetiedon kerääminen ja käsittely ajantasaisen kuvan muodostamiseksi liikennetilanteesta. Luotettavaa, ajantasaista liikennetilannetietoa tarvitaan erilaisissa liikenteen hallinnan toiminnoissa, kuten muuttuvien opasteiden ohjauksessa, dynaamisessa reittiopastuksessa, häiriöiden hallinnassa ja liikennetilannetiedotuksessa. Tiehallinto jakaa liikenteen sujuvuustietoa tienkäyttäjille joukkotiedotuksen avulla esim. radiossa ja internetissä. Mahdollinen kaupallinen palveluntarjoaja voi hyödyntää sujuvuustietoa myös esim. henkilökohtaisten lisäarvopalveluiden tuottamisessa (esim. henkilökohtaiset reittiopastuspalvelut).

Luotettavan liikennetilannearvion saaminen edellyttää tarpeeksi kattavaa, luotettavaa ja ajantasaista liikenteen seuranta. Suurin osa liikenteen seurannasta on tänä päivänä pisteseuranta, vaikka tieosakohtainen liikennetieto (kuten matka-aika ja liikennetiheys) sopii paremmin liikenteen tiedotukseen ja liikenteen ohjauksen tarpeisiin. Tieosakohtaisen tiedon mittaaminen on kuitenkin pistetiedon mittaamista vaikeampaa ja kalliimpaa. Matka-aikoja voidaan seurata esimerkiksi käyttämällä rekisterikilpiä tunnistavia kameroita, mutta laitteistot ovat vielä kalliita. Myös pisteseurantaan tarvittava mittauslaitteisto on nykytekniikalla toteutettuna kallis, joten seurantapisteidien tarkoituksenmukainen sijoittaminen on tärkeää. Kaikki seurantajärjestelmät tuottavat mittausvirheitä, jotka saattavat vaikuttaa liikennetilannearvion onnistumiseen. Näiden seikkojen takia tarvitaan menetelmiä, jotka hajanaista ja osin epävarmaakin seurantatietoa käsittelemällä ja yhdistämällä pystyvät tuottamaan tarpeeksi luotettavan arvion liikennetilanteesta.

Erilaista liikenneolosuhteita ja liikennettä kuvaavia tietoja, kuten liikennemääriä, piste- ja matkanopeuksia, varausasteita jne. saadaan monista eri tietolähteistä, mutta mitattavan sekä tallennettavan tiedon muoto vaihtelee. Liikennetietoa kerätään Suomessa pääasiassa liikenteen automaattisella mittausjärjestelmällä (LAM), joka on alunperin kehitetty tilastoinnin ja liikennesuunnittelun tarpeita varten. LAM-pisteitä voidaan kuitenkin käyttää myös ajantasaiseen liikenteen seurantaan, mikä on viime vuosina lisääntynyt. Itsenäiset ohjausjärjestelmät, kuten liikennevalot ja väyläohjausjärjestelmät, keräävät liikennetietoa omaa toimintaansa varten, mutta tietojen saaminen muiden toimintojen ja palvelujen käyttöön on ollut hankalaa. Lisäksi matka-aikoja mitataan joillakin tiejaksoilla. Liikennetiedon lisäksi seurataan myös säätä ja keliä, jotka vaikuttavat liikenneoloihin. Liikenteen erilaisia tunnuslukuja mitataan usein eri aikarastereilla.

Liikennetilanteesta tiedottamiseen tarvitaan yksiselitteinen sujuvuuden käsite. Sujuvuuden on lisäksi oltava yksikäsitteisesti mitattavissa. Jokaisella on intuitiivinen käsitys siitä, milloin liikenne on sujuvaa. Tienkäyttäjä kiinnittää huomiota mm. tavoitenopeuden ylläpitämiseen, matka-aikaan, matkanopeuteen, liikennemäärään sekä olosuhdetekijöihin (Luoma 1998). Luoma on todennut, että tärkein liikennetilanteen mittari on matka-aika, johon vaikuttavat

JOHDANTO

useat tekijät, kuten liikennemäärä, häiriöt, raskaan liikenteen osuus sekä sään ja kelin muutokset. Matka-ajan käyttöä sujuvuuden mittarina erityisesti liikennetiedotuksessa puoltaa myös se, että matka-aika on tienkäyttäjän helposti mielleltävissä ja havaittavissa. Vaihtoehtoisesti sujuvuuden mittarina voidaan käyttää nopeutta tai liikennetiheyttä.

Saadessaan tietoa liikennetilanteesta verkolla tienkäyttäjä voi valita reittinsä, matkustusajankohtansa ja/tai kulkumuotonsa niin, että hän välttyy ruuhkan aiheuttamilta viivytyksiltä. Tielaitoksen (1993) selvityksessä kävi ilmi, että tienkäyttäjät pitävät liikennetilanteesta tiedottamista tärkeimpänä liikenneinformaatiomuotona. Liikennetilannetiedotus vaikuttaa erityisesti tienkäyttäjän reitinvalintaan, ei niinkään matkan ajankohdan tai kulkuvälineen valintaan. Ruuhkassa liikkumisen välttäminen sekä vähentää tienkäyttäjän stressiä että tuo yhteiskuntataloudellisia säästöjä aikakustannusten pienenemisen myötä. Ruuhkan kesto saattaa lyhentyä, kun tienkäyttäjät osaavat välttää ruuhkaisia paikkoja. Liikenne jakautuu tasaisemmin tieverkolle eli infrastruktuurin käyttö tehostuu. Samalla ympäristöhaitat vähenevät. Myös jo ruuhkassa ajavat kokevat liikkumisen miellyttävämmäksi saadessaan luotettavan arvion matka-ajasta. Matkan hidastumista selittävistä tekijöistä jaettu informaatio koetaan myös tärkeäksi. (Kiljunen ja Summala 1996, Tielaitos 1993.)

1.2 Liikennetilannetiedotuksen nykytila

Tällä hetkellä Tiehallinto tiedottaa liikenteen sujuvuudesta viisiportaisella liikennetilanneluokalla. Sujuvuutta mitataan vertaamalla vallitsevaa nopeutta vapaan liikennevirran keskinopeuteen. Liikennetilanneluokitus perustuu vallitsevan nopeustason alenemaan väylän vapaasta nopeudesta. Vapaa nopeus määritellään teoreettisena nopeustasona, joka vallitsee liikennetiheyden ollessa nolla (Pursula ja Innamaa 2001).

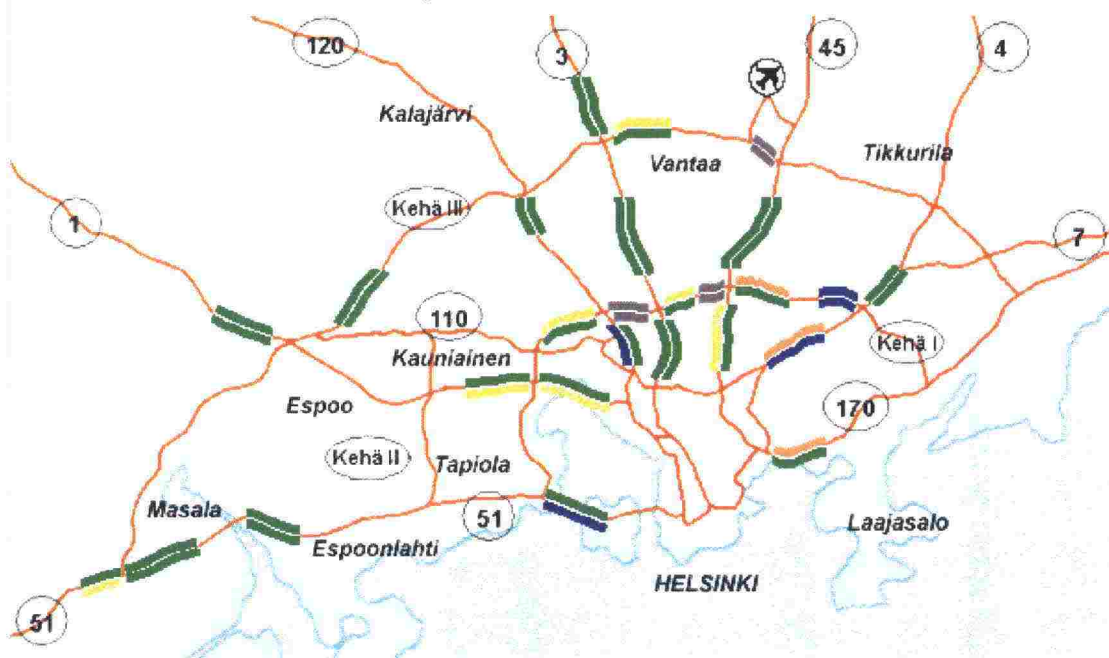
Tiehallinnossa käytetään seuraavaa liikennetilanneluokitusta (taulukko 12) (Tiehallinto 2001):

Taulukko 1. Liikennetilanneluokitus mitatun keskinopeuden ja vapaan virran keskinopeuden suhteen perusteella (Tiehallinto 2001).

Liikennetilanneluokitus	Määritys / sisältö
Liikenne sujuvaa	Liikennevirran keskinopeus on vähintään 90 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne jonoutunut	Liikennevirran keskinopeus on 75-90 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne hidasta	Liikennevirran keskinopeus on 25-75 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne pysähtele	Liikennevirran keskinopeus on 10-25 % vapaan virran keskinopeudesta.
Liikenne seisoo	Liikennevirran keskinopeus on alle 10 % vapaan virran keskinopeudesta.

Tiehallinto tiedottaa liikenteen sujuvuudesta internetissä värikoodatun kartan ja häiriötiedotteiden avulla. Värikoodatulla kartalla esitetään liikenteen sujuvuus (liikennetilanneluokka) pistekohtaisesti ja ajosuunnittain eri väreillä (kuva 1). Tällä hetkellä näytettävä liikennetilanneluokka perustuu induktiosilmukoilla mitattavaan keskimääräiseen pistenopeuteen yhdessä poikkileikkauk-

sessä. Pistenopeuksista voidaan päätellä liikenteen sujuvuustaso mittauspisteen lähiympäristössä, mutta pistetietoa ei aina voida yleistää koko linkin liikennetilanteeksi. Liikennetilannearvion luotettavuutta voitaisiin yksinkertaisimmillaan parantaa yhdistämällä pistenopeuteen liikennemäärätietoa. (Tiehallinto 2003a, Tiehallinto 2001.)



Kuva 1. Esimerkki Tiehallinnon internetsivuilla esitettävästä liikennetilanteen kertovasta värikoodatusta kartasta (Tiehallinto 2003a).

Tiehallinnon internet-sivuilla esitetään nopeustasoon perustuvan liikennetilanneluokan lisäksi mittauspisteessä mitattu liikennemäärä. Omalla sivullaan kerrotaan myös tiedossa olevista liikenteen häiriöistä, jotka vaikuttavat liikenteen sujuvuuteen (kuva 2). (Tiehallinto 2003a.)

JOHDANTO

Häiriöt:**Tie 3, Tampere - Jalasjärvi. Hämeenkyrö. Välillä Sarkkila - Hämeenkyrö.**

Kuorma levinnyt tielle. Liikenne jonoutunut. Tien siivous käynnissä.

Tilanteen kesto: 3.10.2003 klo 12.36 toistaiseksi

Päivitetty 3.10.2003 klo 12:41

Tie 51 eli Länsiväylä. Helsinki. Välillä Lauttasaari, Lemissaaren liittymä - Porkkalankatu.

Lapinlahden sillalla.

Tilanne ohi

Onnettomuuspaikan raivaus ohi, liikenne normaalia. Haittaa ajosuunnassa Helsinki

Tilanteen kesto: 7.10.2003 klo 07.47 - 09.05

Päivitetty 7.10.2003 klo 9:08

Tie 130, Hämeenlinna - Tampere. Lempäälä. Välillä Lastustenkulma - Marjamäki.

Onnettomuus, jossa mukana kuorma-auto. Tie suljettu liikenteeltä.

Poliisi ohjaa liikennettä

Tilanteen kesto: 14.10.2003 klo 16.39 toistaiseksi

Päivitetty 14.10.2003 klo 16:43

Helsinki

Liikennehäiriö. Liikennevalot eivät toimi. Liikennevaloja on poissa käytöstä Töölön alueella tietokonevian vuoksi.

Tilanteen kesto: 27.10.2003 klo 06.41 toistaiseksi

Päivitetty 27.10.2003 klo 6:47

Kuva 2. Esimerkkejä Tiehallinnon internetsivuilla annettavasta häiriötiedotuksesta. (Tiehallinto 2003a.)

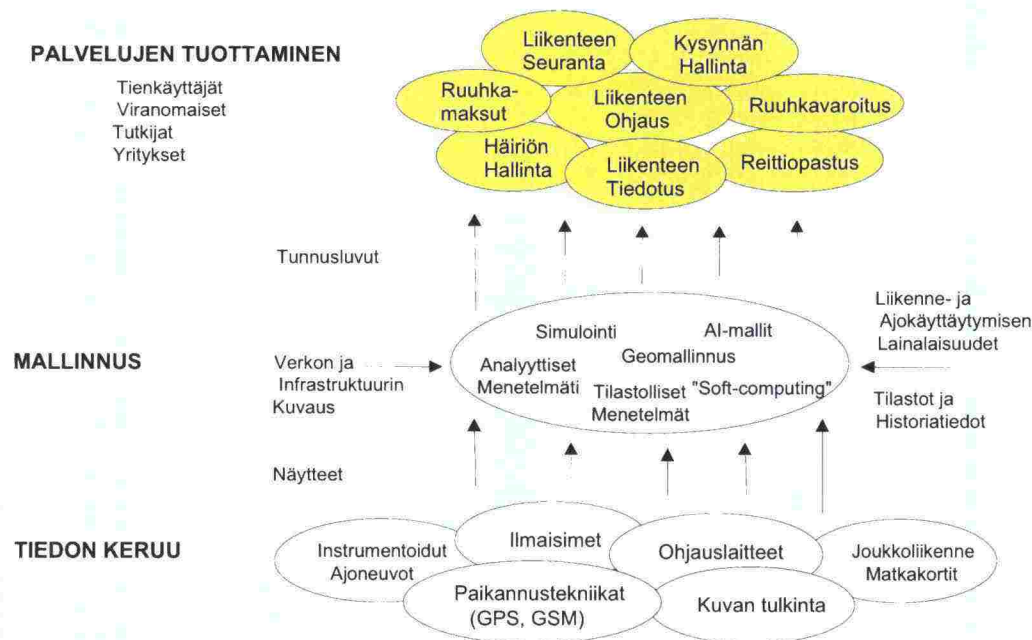
Ajantasaisen sujuvuustiedon lisäksi esitetään normaalitilanteen vertailuaineistoa. Tiedotusta on pääkaupunkiseudun lisäksi muiden suurten kaupunkiseutujen sekä tärkeimpien pääväylien liikennetilanteesta. Liikennetilanteesta tiedotetaan tarkimmillaan viiden minuutin jaksoissa. (Tiehallinto 2003a.)

1.3 DigiTraffic-tutkimuskonsepti

Teknillisen korkeakoulun liikennetekniikan laboratoriossa ja VTT:n rakennus- ja ympäristötekniikan osastolla on käynnissä tutkimusohjelma DigiTraffic, jossa tutkitaan ajantasaisia liikennemalleja ja niiden tuomia mahdollisuuksia eri liikenteen hallinnan toiminnoissa. Mallinnuksen tavoitteena on tuottaa ajantasaisia liikenteen tunnuslukuja. DigiTraffic-konseptin perusajatuksena on koota yhteen eri tietolähteistä ja mittausjärjestelmistä saatavaa tietoa, jotta sitä voidaan järjestelmällisesti käyttää liikenteen mallintamiseen ja analysointiin. Kuvassa 3 on esitetty, miten eri DigiTraffic-hankkeessa hyödynnetään eri tyyppistä lähtötietoa ja mallinnusta liikenteen hallinnan palveluiden tuottamisessa. (Kosonen ym. 2004.)

DigiTraffic-hanke koostuu kolmesta perusosasta, jotka ovat esiselvitys, laboratoriotutkimukset ja pilottihankkeet. Esiselvitysvaiheessa on määritelty mm. DigiTraffic-konseptia, hankkeen tavoitteita, järjestelmän toteutettavuutta sekä järjestelmän rakennetta ja toimintaa yleisellä tasolla. Tämä työ on osa DigiTraffic-hankkeen laboratoriotutkimusosaa. (Kosonen ym. 2004.)

DigiTraffic-hankkeeseen liittyen Teknillisen korkeakoulun Fysiikan laboratoriossa on tutkittu mittauksen ja mallinnuksen problematiikkaa sovellettuna liikenteeseen. Tutkimuksessa on käytetty soluautomaattimalleja.



Kuva 3. DigiTraffic-konsepti (Kosonen ym. 2004).

1.4 Liikennetilanteen arviointiin käytettävissä olevat menetelmät

1.4.1 Menetelmien luokittelu

Kirjallisuudesta löytyy useita eri tyyppisiä menetelmiä ja tapoja, joiden käyttöä liikennetilanteen arviointiin on tutkittu. Osa menetelmistä estimoivat matkaa, osa liikennetiheyttä ja osan avulla voidaan suoraan määrittää liikennetilanneluokka. Liikennetilanteen arviointiin käytettävät menetelmät voidaan luokitella taulukon 2 esittämällä tavalla.

JOHDANTO

Taulukko 2. Liikennetilanteen arviointiin käytettävien menetelmien luokittelu.

Luokka	Pistetiedon käsittely	Liikennevirtamallit	Tilastolliset menetelmät	Tiedon yhdistäminen (data fusion)	Simulointi	Dynaaminen sijoittelu
Menetelmä	pistenopeuksien yleistäminen matkanopeudeksi, matka-ajan arvioiminen pistemittauksen avulla	makroskooppiseen liikennevirtateoriaan perustuvat mallit	historialleistoista muodostettu letokanta, johon ajantasasta mittaustietoa verrataan, aikasarjamallit (ARIMA-mallit)	bayesilainen päättely, Dempster-Shafer -päättely, sumee logikka, neuroverkot, Kalman-suodin, asiantuntijajärjestelmät	ajantasainen mikroskooppinen simulointi, solautomaattimallit	analyttiset menetelmät, simulointi, tietämystekniikka
Ominaisuudet	yksinkertaiset menetelmät, matka-aika saadaan vain mittauspisteeltä toiselle, mittauspisteitä tarvittaisiin paljon nykyistä enemmän	mallin parametrien estimointi tehtävä huolella, ilmasivunvireet aiheuttavat ongelmia, vaatii nykyistä enemmän ilmasimia	liikenteen kausivaihtelu-ominaisuuksien hyödyntäminen, pelkkään historiatietoon perustuvat menetelmät eivät toimi poikkeavissa tilanteissa, tietokannan tutkiminen työläästä	nykyisen liikenteen seurannan hyödyntäminen, monimuotoisen tiedon hyödyntäminen, vuorovaikutussuhteet löytyy määrittää ellei menetelmä tee siitä itse, neuroverkot black box malleja, kälitroitava jokaiselle sovellusalueelle erikseen	vaatii paljon laskentatehoa ja ilmasimia	vaatii paljon laskentatehoa
Tarvittavia lähtötietoja	esim. induktiosilmukoilla mitattu pistetieto (liikennemäärä, nopeus, varausaste)	kaikki linkille saapuva ja poistuva liikenne mitattava eli pistemittaus-tieto linkin alku- ja loppupäässä sekä rampeilla	historiatietoa ja erilaista ajantasasta mitaustietoa liikenteestä	erilaista ajantasasta ja tilastotietoa eri lähteistä (mm. pistemittaus-tieto, matka-aikamittaus, sää ja keli)	ajantasainen esim. induktiosilmukoilla mitattu tieto liikenteen saapumisesta tarkasteltavalle tiejaksole	liikenneverkon kuvaus, OD-matrisi, erilaista mittaustietoa liikenteestä

1.4.2 Pistetietoon perustuvat menetelmät

Yksinkertaisimmillaan liikennetilannetta voidaan arvioida pelkkien pistemittaus-tietojen perusteella. Jos pistemittauksista on tarpeeksi tiheässä ($< 1 \dots 5$ km (Westerman 1995)), saadaan liikennetilanteesta riittävän luotettava kuva tarkastelemalla esimerkiksi pelkkiä pistenopeuksia. Pistetiedon voidaan olettaa kuvaavan myös pidemmän tieosan liikennetilannetta. Virhepäätelmien riski on kuitenkin sitä suurempi, mitä pidempi ja ominaisuuksiltaan epähomogeenisempi tieosa on.

Matka-aikoja voidaan arvioida pistemittauksesta saatavan tiedon avulla usealla eri tavalla esim. tunnistamalla sama ajoneuvo kahdessa peräkkäisessä induktiosilmukoilla toteutetussa mittauspisteessä ajoneuvon tuottaman yksilöllisen induktioprofiilin avulla. Matka-ajan mittaaminen pistemittauksen avulla soveltuu lähinnä lyhyille seurantajaksoille, mikä laajempien alueiden seurannassa johtaa mittauspisteiden suureen määrään. Matka-ajan arvioimista pistemittauksen avulla selvitetään tarkemmin luvussa 3.1.3. (Westerman 1995.)

Cortés ym. (2002) esittelevät menetelmän, jossa tiejakson matka-aikaa arvioidaan pistenopeuksien avulla rekursiivisesti. Heidän mukaansa tiejakson matkanopeus voidaan estimoida eri paikoissa mitattujen pistenopeuksien keskiarvojen lineaarikombinaationa. Menetelmässä käytetään ylävirrassa ajanhetkellä t ja alavirrassa ajanhetkellä $t+T$ mitattuja pistenopeuksia, missä T on matka-aika ilmaisinten välillä. Ylä- ja alavirrassa mitattuja pistenopeuksia painotetaan kertoimella, joka on yksinkertaisimmillaan 0,5, kun matkanopeuden oletetaan olevan pistenopeuksien keskiarvo. Matka-ajan arvo T määritetään rekursiivisesti. Alkuarvona käytetään pelkästään ylävirran ilmaisimella mitatun pistenopeuden mukaan laskettua matka-aikaa. Cortés'n ym. (2002) mukaan matka-ajan estimaatti konvergoi, ellei liikennevirta kärsi liian suurista häiriöistä.

Zou ja Levinson (2002) käyttivät ruuhkautuneisuuden havaitsemiseen liikennemäärän ja liikennetiheyden ristikorrelaatiota. Heidän mukaansa liikennemäärä ja -tiheys käyttäytyvät samankaltaisesti vapaassa liikennetilanteessa. Ruuhkassa liikennemäärä ensin kasvaa ja putoaa sitten äkillisesti. Liikennetiheys kasvaa nopeasti verrattuna liikennemäärään ja nopeus putoaa. Risti-

korrelaatio kuvaa liikennemäärän ja liikennetiheyden keskinäistä korrelaatiota. Liikennetilanteen ollessa vapaa ristikorrelaatio vaihtelee vain vähän, mutta muuttuu jyrkästi siirryttäessä ruuhkaan ja jälleen ruuhkasta vapaaseen liikennevirtaan. Zoun ja Levinsonin (2002) tutkimuksessa huomattiin, että ruuhkaantuminen tapahtuu, kun ristikorrelaation muutos ylittää tietyn kokeusperäisen kynnyksarvon. Tutkimuksessa käytettiin ilmaisimen varausastetta arvioimaan liikennetiheyttä. Ristikorrelaation muutos saavuttaa maksimiarvonsa nopeuden pudotessa noin 75 %:iin vapaasta nopeudesta. Tämä vastaa Tiehallinnon käyttämässä liikennetilanneluokittelussa tilannetta, jossa liikenne muuttuu jonoutuneesta hitaaksi.

Suurin osa liikennetilanteen arviointiin kehitetyistä menetelmistä on keskittynyt korkealuokkaisille väylille, joilla ei ole liikennevaloja. Liikennevalomaisimilta ja -kojeilta saatavaa tietoa voidaan kuitenkin hyödyntää liikennetilanteen arvioimisessa. Perrin ym. (2003) ovat tutkineet liikennevaloilmaisimien mittaustietojen reagoimista palvelutason laskuun Salt Lake Cityn ympäristössä. Simulointikokeiden perusteella havaittiin, että pysäytysviivan tuntumassa olevan ilmaisimen varausaste ei juurikaan muuttunut liikennetilanteen muuttuessa, vaan pysytteli koko ajan 80 %:n tuntumassa. Sen sijaan pidemmälle sijoitetun kulkuihmaisimen varausaste kasvoi jyrkästi, kun liikennemäärä kasvoi niin suureksi, että jono ei enää purkautunut jokaisessa kierrossa. Liittymän kuormitusasteen ollessa alle 1,0 pidemmälle sijoitetun ilmaisimen varausaste ei ylittänyt 20 %:a. Kuormitusasteen kasvaessa suuremmaksi kuin 1,0, varausaste nousi nopeasti 90 %:iin. Liikennevalojen kulkuihmaisimella voitiin havaita ruuhka vain silloin, kun liittymän kuormitusaste on yli 1,0. Ongelmia aiheutui silloin, kun ruuhka sijaitti liittymien välillä eikä liittymässä. Liikennemäärä on tällöin liittymässä alhainen, mikä viittaa ruuhkattomiin oloihin.

Pistetiedon käsittelymenetelmät ovat kiinnostavia yksinkertaisuutensa vuoksi sekä siksi, että liikenteen seuranta perustuu nykyisin valtaosin pisteseurantaan. Luotettavien liikennetilannearvioiden tekeminen pelkkään pistetietoon perustuen vaatii kuitenkin nykyistä tiheämpää ilmaisinsijoittelua. Ilmaisinten välimatkan tulisi olla korkeintaan muutama kilometri, koska pistemittauksella voidaan seurata tilannetta vain yhdessä poikkileikkauksessa.

1.4.3 Makroskooppiset liikennevirtamallit

Kirjallisuudesta löytyy useita eri tyyppisiä makroskooppisia liikennevirtamalleja, jotka kuvaavat liikennevirtaa liikennemäärän, liikennetiheyden ja nopeuden avulla. Yksinkertaisin Lighthillin ja Whithamin vuonna 1955 esittelemä malli perustuu jatkuvuusyhtälöön ja liikennevirran perusyhtälöön. Mallilla pystytään esittämään mm. liikennevirran nopeuden riippuvuus liikennetiheydestä sekä shokkiaallot. Yksinkertaista, ensimmäisen kertaluvun jatkuvuusyhtälöön perustuvaa mallia (simple, first-order continuum macroscopic model) on kritisoitu mm. siitä, että siinä ei huomioida reaktioaikaa, vaan muutosten esim. nopeudessa oletetaan tapahtuvan välittömästi liikennetiheyden muuttuessa. Tämä johtaa epärealistisen suuriin arvoihin kiihtyvyydessä ja hidastuvuudessa. Nopeuden ei sallita vaihtelevan tasapainonopeuden ympäristössä eikä malli myöskään pysty kuvaamaan ruuhkassa esiintyvää ns. stop-and-go -liikettä. (Nanthawichit 2003, Papageorgiou 1998.)

JOHDANTO

Ensimmäisen kertaluvun liikennevirtamallia voidaan kehittää korvaamalla nopeuden ja liikennetiheyden keskinäinen riippuvuussuhde yhtälöllä, joka ottaa huomioon mm. ajoneuvojen kiihdytyksen ja reaktioajan. Näin päädytään korkeamman kertaluvun makroskooppisiin malleihin (high-order continuum macroscopic model). Tunnetuin toisen kertaluvun Paynen vuonna 1971 esittelemä malli ottaa huomioon nopeuden, jolla ajoneuvot tulevat tarkasteltavalle tiejaksolle, nopeuden sopeuttamisen vallitseviin olosuhteisiin reaktioajan puitteissa sekä ennakoimisen (huomioidaan liikennetiheyden muutos alavirrassa). (Nanthawichit 2003, Papageorgiou 1998.)

Toisen kertaluvun mallitkin ovat saaneet osakseen kritiikkiä. Daganzo (1995) esittää, että toisen kertaluvun mallit saattavat vain huonontaa tilannetta ensimmäisen kertaluvun malleihin verrattuna. Vaikka liikennetiheyden epäjatkuvuuskohdista päästään eroon, malli antaa tietyissä tilanteissa negatiivisia liikennemääriä ja nopeuksia. Liikennettä ei voida täysin kuvata nestevirtausanalogian avulla mm. siitä syystä, että liikenteessä "partikkeleiden" eli ajoneuvojen ominaisuudet vaihtelevat (mm. kuljettajien hyväksymät aikavälit ja tavoitenopeus). Liikenteessä ajoneuvoihin vaikuttavat yleensä vain edestä (eli alavirrasta) tulevat ärsykkeet, kun taas nestevirtauksen partikkelit reagoivat sekä edestä että takaapäin tuleviin ärsykkeisiin.

Papageorgiou (1998) esittää, että liikennevirran jatkuvuusyhtälö on ainoa liikennevirtaa kuvaava tarkka, luonnonlaista johdettu riippuvuus liikennevirran makroskooppisten muuttujien välillä. Muut yhtälöt ovat enemmän tai vähemmän approksimaatioita ja yksinkertaistuksia. Makroskooppisten mallien tarkkuuteen vaikuttavat lisäksi niiden parametrit, jotka tulee kalibroida huolellisesti käyttämällä luotettavaa mittaustietoa liikenteestä.

Yksinkertaisissa liikennevirtamalleissa käytetään lähtötietona lähinnä piste-mittaustietoa, mikä tarkoittaa, että mallit hyödyntävät nykyistä liikenteen seurantatekniikkaa. Liikennevirtamalleihin voidaan lisäksi yhdistää myös muunlaista mittaustietoa käyttämällä esimerkiksi Kalman-suodinta. Liikennevirtamallien käyttö vaatii kuitenkin nykyistä tiheämpää ilmaisinsijoittelua. Ilmaisimia olisi hyvä sijoittaa vähintään muutaman kilometrin välein. (Nanthawichit 2003, Papageorgiou 2003.)

1.4.4 Tilastolliset menetelmät

Van Grol ym. (2000) esittävät, että toistuvat ruuhkat saadaan helpoimmin ennakoitua hyödyntämällä tietokantoja, joihin on tallennettu historiatietoa liikenteestä. Heidän mallissaan liikennetietokanta jaetaan viikonpäivien mukaan seitsemään luokkaan. Luokittelu voitaisiin tehdä myös säätyypin mukaan. Liikennettä seurataan jatkuvasti ja tietokantaa päivitetään uusien mittaustulosten avulla.

Van Grol'n ym. (2000) menetelmässä tietokannan tiedot yhdistetään ajantasaiseen mittaustietoon. Vaikka absoluuttiset arvot eivät toistu samana päivästä toiseen, liikennetilanteen oletetaan noudattavan samankaltaista kehityskulkua. Liikennetilanteen ennusteen aikahorisontin kasvaessa ajantasaisen tiedon merkityksen on kuitenkin huomattu vähenevän. Ajallisen korrelaation sijaan van Grol ym. (2000) ehdottavat sijaintiin liittyvää korrelaatiota. Mikäli ajantasaisessa mittauksessa ja tietokannan tiedossa on ylävirran mitta-

uspisteellä eroa, voidaan olettaa, että vastaava ero nähdään pian myös alavirran mittauspisteellä. Korrelaatio luonnollisesti heikkenee mittauspisteiden välimatkan kasvaessa.

Hollannissa on kehitetty moottoritiejaksolle sopiva matka-aikojen estimointiin käytettävä malli GERDIEN (General European Road Data Information Exchange Network) -projektissa. Menetelmän syötetietoina käytetään induktioilmaisimilla minuutin jaksoissa mitattua nopeutta ja liikennemäärää. Kaikki tiejaksolle tuleva ja siltä poistuva liikenne mitataan (myös liikenne rampeilla). (van Arem ja Vlist 1994.)

Van Aremen ja Vlistin (1994) esittelemässä menetelmässä liikennetilanteen arviointi aloitetaan tarkastelemalla tiejaksolle tulevan ja siltä poistuvan liikenteen pistenopeuksia. Mikäli ainakin toinen nopeuksista on ennalta asetettua kynnysarvoa alempi, päätellään tiejakson olevan ruuhkautunut. Algoritmin toisessa osassa käytetään ruuhkan havaitsemiseen ARMA- eli Autoregressive Moving Average aikasarjamallia. Mallissa esitetään tiejaksolta poistuva liikennemäärä ajanhetkellä t funktiona poistuvista ja saapuvista liikennemääristä edellisillä ajanhetkillä. Mikäli ARMA-mallin estimointi onnistuu, sen avulla voidaan määrittää, minkä tyyppinen liikennetilanne on. Liikennetilanteen määrittämiseen käytetään impulssivastetta, joka kuvaa systeemin ulostulon käyttäytymistä, kun systeemiin syötetään yksikköimpulssi. Tässä tapauksessa tarkastellaan, miten tiejaksolta poistuvien ajoneuvojen määrä käyttäytyy, kun tiejaksolle syötetään ajoneuvo (oletetaan, että poistuvien ajoneuvojen määrä alussa on nolla). Ruuhkassa tiejaksolle saapuu enemmän ajoneuvoja kuin siltä poistuu ja vastaavasti, kun ruuhka on purkautumassa, tiejaksolta poistuvien ajoneuvojen määrä on suurempi. Ruuhkaisuus varmistetaan vielä käyttämällä yksikköimpulssikokeen keskimääräistä vasteaikaa, jota voidaan käyttää matka-ajan estimaattina. Mikäli keskimääräinen vasteaika on ennalta asetettua kynnysarvoa suurempi, liikennetilanteen katsotaan olevan ruuhkainen.

Historiatiedon ja liikenteen kausivaihteluominaisuuksien huomioiminen liikennetilanteen arvioimisessa vaikuttaa järkevältä, koska liikennetilanteet toistuvat pitkälti samankaltaisina samoina viikonpäivinä ja samaan kellonaikaan. Pelkkä historiatieto ei kuitenkaan yksin riitä ajantasaisen liikennetilante-estimaatin muodostamiseen, vaan historiatietoon on hyvä yhdistää ajantasaista mittautietoa. Tämän työn puitteissa ei ole mahdollista analysoida historiatietokantoja, eikä tilastollisiin menetelmiin perehtyä tarkemmin.

1.4.5 Datafuusiomenetelmät

Datafuusiomenetelmien tarkoituksena on yhdistää eri lähteistä saatavaa, mahdollisesti eri yksiköissä esitettyä tietoa. Lähtötietoa yhdistämällä pyritään sekä lisäämään tiedon luotettavuutta sekä saamaan tarkasteltavasta järjestelmästä aivan uudentyyppistä tietoa. Datafuusion avulla tiedon vähenetään mahdollisten vaihtoehtoisten päätelmien määrää ja havaitaan tilanteen muutokset nopeammin, kuin yhtä tietolähdettä käytettäessä. Useiden tietolähteiden avulla saadaan liikenneverkosta kattavammat seurantatiedot ja järjestelmä pystyy toimimaan yhden tietolähteen vikaantumisesta huolimatta. Liikennetekniikassa datafuusiomenetelmiä käytetään mm. häiriöiden automaattiseen havaitsemiseen. Liikenteen sovelluksissa käytetyimmät tekniikat

JOHDANTO

ovat neuroverkot, sumea logiikka, asiantuntijajärjestelmät sekä Kalman-suodin. Muita datafuusioteknikoita ovat mm. bayesilainen ja Dempster-Shafer -päätely. (Dailey ym. 1996, Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Datafuusiomenetelmillä voidaan yhdistää eri lähteistä saatavaa (mittaus)tietoa suoraan liikennetilanteen estimaatiksi. Toinen vaihtoehto on yhdistää eri menetelmillä saadut liikennetilanteen estimaatit luotettavammaksi arvioksi vallitsevasta liikennetilanteesta. Hellinga ja Gudapati (2000) esittivät, että yhteen tietolähteeseen perustuva matka-aikaestimaatti ei välttämättä ole tarpeeksi tarkka ja luotettava esimerkiksi sen takia, että lähtötiedot eivät ole ajallisesti jatkuvia tai kata koko tieverkkoa. Hellinga ja Gudapati (2000) estimoivat tiejakson matka-ajan ensin käyttämällä erikseen pistemittaus-tietoja, anturiajoneuvojen tietoja ja tienkäyttäjiltä saatuja liikennetilanneraportteja. He ehdottivat estimaattien yhdistämistä jollain datafuusiomenetelmällä ottamalla huomioon eri estimaattien luotettavuuden.

Myös Choi ja Lee (1997) estimoivat matka-ajan ensin erikseen pistemittaus-tiedosta, anturiajoneuvojen tiedoista, kameroista saatavasta liikennetilante-tiedosta ja sanallisten raporttien perusteella. Ajantasaisen tiedon lisäksi mat-ka-ajalle estimoituihin alkuarvot staattisen makroskooppisen simulointiohjelman avulla. Choi ja Lee (1997) oletivat parhaan matka-aikaestimaatin olevan li-neaarikombinaatio yhden tietolähteen perusteella estimoiduista, alustavista matka-aikaestimaateista. He käyttivät sumeaa logiikkaa määrittämään eri lähteistä estimoitujen matka-aikojen painokertoimet lopullisessa matka-aika-arviossa. Painokertoimien sumeaa määrittämiseen käytettiin tiedon luotet-tavuustasoa.

Offermann (2001) yhdisti pistemittaus-tietoja ja anturiajoneuvojen tietoja su-mean logiikan ja neuroverkkojen avulla linkin matkanopeusestimaatiksi. Of-fermannin (2001) sumea päätely koostui kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa analysoitiin pistemittaus-tietoa ja pääteltiin, miten hyvin pistenopeudet kuvaavat koko linkin nopeustasoa. Toisessa osassa anturiajoneuvotiedot yhdistetään pistemittauksiin painottamalla tiedon luotettavuutta. Anturiajo-neuvotietojen luotettavuus riippuu anturiajoneuvojen määrästä suhteessa liikennetilanteeseen. Liikennetilanteen ollessa vapaa ja nopeuksien vaihdel-lessa paljon, anturiajoneuvoja tarvitaan enemmän kuin nopeuksien vaihtelun ollessa pientä. Menetelmässä sumean logiikan toiminta on kalibroitu neuro-verkkojen avulla.

Kalman-suodinta käytetään yhdistämään mallin ja mittauksen antama tulos niiden luotettavuuden suhteessa. Kalman-suotimen teoria pätee vain lineaa-risille systeemeille, mutta epälineaarisille systeemeille voidaan soveltaa laa-jennettua Kalman-suodinta. (Welch ja Bishop 2003.) Dailey ym. (1996) ovat hyödyntäneen tilastotietoa ja Kalman-suodinta estimoidessaan nopeutta yksittäisten silmukakkailmaisinten mittaus-tiedoista.

Vaikka liikennetilanteen analyttinen mallintaminen on vaikeaa, monet asian-tuntijat (esim. liikennekeskuksen päivystäjät) pystyvät antamaan arvion lii-kennetilanteesta saamiensa lähtötietojen ja kokemuksen tuoman asiantun-temuksen pohjalta. Asiantuntijajärjestelmät ovat tietokoneohjelmia, jotka pyrkivät hyödyntämään asiantuntijoiden tietämystä automaattisissa päätely-järjestelmissä. Asiantuntijajärjestelmät koostuvat tyypillisesti kolmesta osas-ta: käyttöliittymästä, päätelyjärjestelmästä ja tietokannasta. Käyttöliittymän avulla ongelma ja tulokset esitetään sanallisessa muodossa. Päätelyjärjes-

telmä ja tietokanta muodostuvat faktoista, heuristiikoista, analogioista ja säännöistä, joilla mallinnetaan asiantuntijan ongelmaan liittyvä tietämys. Päättelyjärjestelmä soveltaa asiantuntijatietokannan sääntöjä ja algoritmeja ajantasaisiin mittaustietoihin ja päättää ratkaisun ongelmaan. (Dailey ym. 1996, Klein 2001.)

Asiantuntija-arvioita ja tietämystekniikkaa hyödynnetään liikenteen hallinnassa mm. Saksassa, Hessenissä, missä erityisesti Frankfurtin seutu kärsii ruuhkista. Mittaustietoa liikenteestä kerätään n. 1800 ilmaisinsilmukalla. Mittaustiedot liikennemääristä ja pistenopeuksista talletetaan tietokantaan. Tiedoista muodostetaan jokaiselle viikonpäivälle ja poikkileikkaukselle aikasarja, joka kuvaa tyypillisen, keskimääräisen tilanteen liikennemäärää ja nopeutta. Sumeaan logiikkaan perustuvalla tekniikalla asiantuntijoiden on mahdollista käyttää lingvistisiä ilmaisuja tietämyksensä esittämiseen. (Elster ja Hübner 2002.)

Bayesilaista ja Dempster-Shafer -päättelyä, neuroverkkoja, sumeaa logiikkaa, Kalman-suodinta ja asiantuntijajärjestelmiä hyödyntäviä projekteja on esitelty lisää lähteessä Dailey ym. (1996).

Datafuusiomenetelmien avulla voidaan hyödyntää erityyppisiä ja eri lähteistä saatavia lähtötietoja. Tämä vaikuttaa järkevältä, koska liikennetilannetta voidaan kuvata useilla eri tunnusluvuilla, ja koska lähtötietoa liikennetilanteen arviointiin voidaan kerätä useilla erilaisilla järjestelmillä. Erilaisten järjestelmien lähtötietojen hyödyntäminen on myös kustannustehokasta, koska päälekkäisiltä järjestelmiltä vältetään. Datafuusiomenetelmien käyttö ei välttämättä kuitenkaan ole aivan suoraviivaista. Mm. sumeaa logiikkaa käytettäessä mallinnettavasta järjestelmästä on oltava tarpeeksi lähtötietoa ja eri tekijöiden vuorovaikutussuhteet täytyy tuntea.

1.4.6 Liikenteen simulointi

Simulointimalleissa yhdistyvät sekä tietomallit että laskentamallit. Simulointi on ns. rakenteellinen malli, joka sisältää kuvauksen mallinnettavasta kohteesta toisin kuin esimerkiksi neuroverkot tai sumea logiikka. Ajantasaisessa simuloinnissa liikenteestä saatavat mittaustiedot syötetään simulointimalliin, jota ajetaan reaaliajassa. Simulointimallin tehtävä on täyttää mittaustiedoissa olevat aukot eli interpoloida mittausnäytteiden välillä sekä aika- että tilaolutuvuudessa. Mallista voidaan laskea erilaisia liikenteen tunnuslukuja, kuten matka-aikoja, jonopituuksia, liikennetiheyttä jne. Nykytilanteen liikenteen mallinnuksen lisäksi simuloimalla voidaan tehdä myös lyhyen ajan liikenneennusteita, kun liikennejärjestelmän nykytila tiedetään tarpeeksi tarkasti. Tällöin simulointimallia ajetaan nopeutetusti eteenpäin. Ajantasaisessa simuloinnissa käytettävä malli ei saa olla laskennallisesti liian raskas, mutta sen on kyettävä kuvaamaan liikennettä tarpeeksi realistisesti. (Kosonen ym. 2004.)

Ajantasaista simulointia varten tarvitaan tieto tarkasteltavalle linkille tulevas- ta liikennemäärästä. Ilmaisimet tulisi siis sijoittaa linkin alkuun. Ajoneuvot generoidaan malliin näiden ilmaisimien mittaustietojen perusteella. Ajoneuvojen liikkuminen linkillä perustuu liikennevirran lainalaisuuksiin, jotka mallinnetaan simulointiohjelmassa esim. ajoneuvon seurantasaäntöinä. Liiken-

JOHDANTO

nevaloja sisältävässä ympäristössä tiedonkeruussa voidaan hyödyntää liikennevalojen ohjauskojeita. Valo-ohjauksisten liittymien ilmaisimet eivät yleensä riitä ajantasaisen simuloinnin lähtötietojen tuottamiseen, koska liikennevalojen toiminnan säätämiseen käytettävät ilmaisimet sijaitsevat ennen liittymää eli linkin lopussa. Lisää ilmaisimia voidaan kuitenkin asentaa kohtuullisin kustannuksin liittymän jälkeen. Linkin lopussa olevia ilmaisimia voidaan käyttää simulointimallin tarkkuuden ja laadun parantamiseen vertaamalla simuloinnin tuottamia tietoja ilmaisintietoihin linkin lopussa. (Kosonen ym. 2004.)

Soluautomaatti (cellular automaton) on yksinkertaistettu ajan ja paikan suhteen diskreetti mikroskooppinen liikennevirtakuvaus. Soluautomaateissa liikenneväylät muodostuvat elementeistä, soluista, joissa voi olla kerrallaan vain yksi ajoneuvo. Ajoneuvojen siirtyminen solusta toiseen kuvataan yksinkertaisilla säännöillä, joilla mallinnetaan turvavälit ja ajonopeuteen ja sen muutoksiin liittyvät rajoitukset. Mallia päivitetään lyhyin, yleensä 1 s aika-askelin. Ajoneuvon nopeus ilmaistaan yhdessä aika-askeleessa edettävien solujen lukumääränä. Nopeus muuttuu siis kohtuullisen suurin askelin, jolloin kiihtyvyydet ja hidastuvuudet voivat saada epärealistisen suuria arvoja. (Pursula 2000.)

Soluautomaatit eivät kuvaa liikennevirtaa mikroskooppisen tarkasti vaan niillä pyritään saavuttamaan realistinen makroskooppinen kuvaus liikennevirrasta ja suuri simulointinopeus. Soluautomaatit sopivat käytettäväksi suurten liikenneverkkojen yleiskuvaukseen. Soluautomaattimalleilla on tehty laajamittaisia simulointeja mm. Yhdysvalloissa. Soluautomaattimalleja on sovellettu myös ajantasaisessa simuloinnissa ainakin Duisburgin kaupungin liikenneverkossa. Liikenne generoidaan tällöin tieverkolle sijoitettujen ilmaisinten mittaustietojen perusteella. Yksi soluautomaattien mahdollinen käyttökohde on liikenteen sijoittelu reitinvalinnan kuvauksen yhteydessä. (Pursula 2000.)

Teknillisen korkeakoulun Fysiikan laboratoriossa on tutkittu mittauksen ja mallinnuksen systematiikkaa soluautomaattimalleilla. Tutkimuksessa on yritetty toistaa kehittyneemmän mikrosimulointimallin, Hutsimin liikennedynamiikkaa yksinkertaisemmilla soluautomaattimalleilla. Hutsim-malli edustaa työssä todellista liikennetilannetta, jota pyritään mallintamaan soluautomaattien avulla rajoitettuun määrään ajantasaista mittaustietoa perustuen. Tavoitteena on mallintaa mm. matka-aikoja ja jonopituuksia mahdollisimman tarkasti ja tutkia yksinkertaisemman mallin mahdollisuuksia liikenteen mallintamisessa. (Kosonen ym. 2004.)

Mikroskooppisen simuloinnin avulla voidaan mahdollisesti mallintaa liikennetilanne hyvinkin tarkasti ja tarkastella myös esim. jonojen pituuksia. Simulointimallin on tällöin oltava tarkka ja ajantasaista lähtötietoa on oltava tarpeeksi, mikä tarkoittaa ilmaisinten määrän kasvamista suureksi. Tässä työssä ei perehdytä simulointiin tarkemmin, koska sitä tutkitaan enemmän TKK:n DigiTraffic-hankkeen muissa osissa.

1.4.7 Dynaaminen liikenteen sijoittelu

Liikenteen dynaamisella sijoittelulla tarkoitetaan prosessia, jossa määritetään dynaaminen lähtöpaikka-määräpaikkajakauma ja liikenteen jakautuminen tieverkon linkeille. Liikenteen kysynnän alkuarvo tunnetaan etukäteen historiatietojen pohjalta määritettynä lähtöpaikka-määräpaikkamatriisina. Matriisia päivitetään mittaustietojen perusteella. Sijoitteluun käytetään joko systeemi- tai käyttäjäoptimia. Systeemioptimissa koko verkon matkavastus (matka-aika) minimoituu. Käyttäjäoptimi puolestaan on tilanne, jossa yksikään tienkäyttäjä ei voisi muuttaa reittiään kasvattamatta omaa matkavastustaan. (Antoniou 1997.)

Sijoitteluun perustuva järjestelmä on käytössä mm. Berliinin liikenteen hallinnassa. Mallinnettava Berliinin päätieverkko koostuu noin 10 000 linkistä. Liikenteen kysyntä tunnetaan 500 aluetta käsittävänä lähtöpaikka-määräpaikkajakaumana, joka on määritetty historiatietojen perusteella erikseen aamu- ja iltaruuhkalle sekä muulle ajalle. Tieverkolla seurataan liikennemääriä ja nopeuksia noin 200 poikkileikkauksessa. Valitussa lähestymistavassa reitinvalinnan ja kysynnän estimointi on erotettu linkkien liikennemäärän estimoinnista. Linkkien liikennemäärä estimoidaan viiden minuutin välein, mutta koska sijoittelu on hidas prosessi, se tehdään vain tunnin välein. Mallissa oletetaan, että reitinvalinta ei muutu yhtä nopeasti kuin liikennetilanteet linkeillä. Mittaustiedot liikenteestä yhdistetään kysyntämatriisin alkuarvoon sumeaa logiikkaa käyttävällä TFlowFuzzy-menetelmällä. Liikenteen kysyntä voitaisiin periaatteessa päätellä myös suoraan mittaustiedoista, mutta tulokset ovat parempia, kun lähtöarvona on historiatietojen perusteella saatu kysynnän lähtöarvo. (Vortisch ja Möhl 2003.)

Dynaamista sijoittelumallia hyödynnetään myös Münchenin alueella. Dynaaminen liikenneverkkomalli DINO päivittää 15 minuutin välein kiinteistä mittauspisteistä ja anturijoneuvoilta saatavien tietojen perusteella liikennetilanteen kuvauksen verkolla. Sijoittelu tehdään iteratiivisella menetelmällä, joka määrittelee linkkikohtaiset liikenneolot (liikennemäärä, tiheys, nopeus) käyttäen ajan ja liikennetiheyden funktiona vaihtelevia linkkien toimivuusfunktioita. Informaationminimointialgoritmillä yhdistetään estimoidut lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit ja havaitut mittaukset linkeiltä. Malli pyrkii dynaamiseen käyttäjäoptimiin. (Logi ym. 2002.)

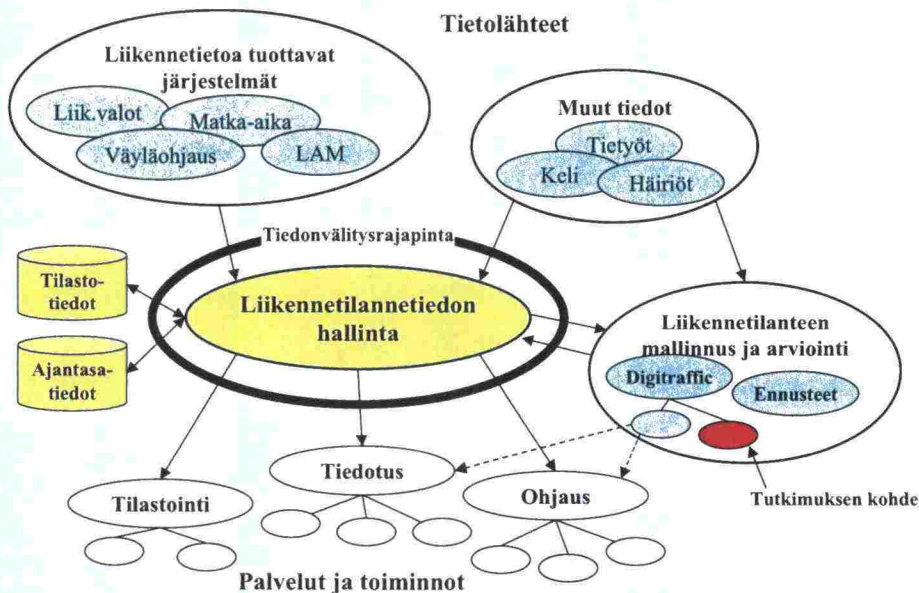
Tässä työssä ei perehdytä sijoittelumenetelmiin tarkemmin.

1.5 Tutkimuksen tavoite ja sisältö

Tässä työssä keskitytään liikennetilannetiedotuksen vaatimaan sujuvuustietoon. Työssä tutkitaan liikennetilanteen arviointimenetelmiä ja niiden tarvitsemia liikennetietoja liikennetilannetiedotuksen näkökulmasta. Liikennetilannearvio muodostetaan linkkikohtaisesti. Linkillä tarkoitetaan tässä yhteydessä (pää)liittymäväliä. Liikennetilanne voi olla liittymävälilläkin epähomogeeninen, mutta liikennetiedotuksessa tilannetta on mielekästä tarkastella juuri liittymäväleittäin, koska tienkäyttäjä voi muuttaa reittiään liittymissä. Liikennetilanteen ja sujuvuuden mittarina käytetään matkanopeutta, joka saadaan tiejakson pituuden ja matka-ajan osamääränä. Tällöin voidaan hyödyntää Tiehallinnon liikennetilanneluokitusta yksinkertaisesti korvaamalla pisteno-

JOHDANTO

peus matkanopeudella. Kuvassa 4 on esitetty, miten liikennetilanteen arviointi liittyy laajempaan liikennetilannetietojen hallintaan ja liikenteen hallinnan palveluiden prosessiin.



Kuva 4. Liikennetilanteen arviointimenetelmän liittyminen liikenteen hallinnan prosessiin (Tiehallinto 2003b). Tutkimuksen kohde merkitty kuvaan punaisena.

Työssä selvitetään ensin, millaisia tietoja eri liikenteen seurannan järjestelmät tuottavat ja miten niitä voidaan käyttää lähtötietoina liikennetilanteen arvioimisessa. Kirjallisuustutkimuksen avulla selvitetään, millaiset menetelmät ovat käyttökelpoisimpia liikennetilanteen arvioinnissa, kun käytettävissä olevan lähtötiedon määrä ja laatu vaihtelee. Kuvassa 5 esitetään periaate, miten eri lähteistä (järjestelmistä) saatavia liikennetietoja yhdistelemällä laaditaan linkkikohtaiset arviot liikennetilanteesta. Tutkimuksen kohde on merkitty kuvaan keltaisella.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella valitaan menetelmät, joiden ominaisuuksiin perehdytään tarkemmin. Näitä menetelmiä testataan simulointikokeessa. Simulointikokeessa selvitetään eri tyyppisten menetelmien ominaisuuksia sekä niiden soveltuvuutta erilaisiin liikennetilanteisiin. Tavoitteena on selvittää, mitä lisäarvoa liikennetilanteen arviointiin saadaan käyttämällä pistenopeuden mittaamista monimutkaisempia ja kehittyneempiä menetelmiä. Simulointikokeessa tarkastellaan myös ilmaisinsijoittelun merkitystä liikennetilanteen arvioimisen kannalta. Työssä keskitytään lähinnä pistemittaustietojen hyödyntämiseen ja datafuusiomenetelmiin.

Tavoitteena on antaa suosituksia liikenteen ajantasaisen seurannan kehittämisestä, sekä muodostaa käsitys, miten liikennetilanteen arviointiin käytettäviä menetelmiä voidaan parhaiten soveltaa Suomessa.

2 LIIKENNETIEDOT JA NIITÄ KERÄÄVÄT JÄRJESTELMÄT

2.1 Erimuotoiset liikennetiedot

Liikenteestä kerätään tietoa sekä piste- että tieosakohtaisesti. Pistekohtainen mittaus on helppoutensa vuoksi huomattavasti yleisempää. Pistetietoa eli poikkileikkauskohtaisia liikennettä kuvaavia parametreja ovat mm. liikennemäärä, pistenopeus, ilmaisimen varausaste ja aikavälit. Yleisimmin käytetty pistekohtaisen tiedon mittausmenetelmä on induktiosilmukkailmaisoin. Tieosakohtaista liikennetietoa ovat matka-aika, matkanopeus ja liikennetiheys. Matka-aikoja seurataan Suomessa automaattisen ajoneuvontunnistuksen (rekisterikilpien tunnistuksen) avulla. Matka-aikoja voidaan mitata myös mm. matkapuhelinpaikannuksen ja tietullijärjestelmien avulla. Maailmalla käytetään paljon anturiajoneuvoja, mutta Suomessa niitä ei toistaiseksi ole liikenteen seurannassa käytössä.

2.2 Pisteseuranta

2.2.1 Liikenteen automaattinen mittaus (LAM)

Suomen tieverkolla on tällä hetkellä noin 300 automaattista liikenteenmittaus- eli LAM-pistettä. LAM-pisteet on toteutettu tiehen upotettavien induktiosilmukoiden avulla. Yhdellä silmukkailmaisimella saadaan mitattua liikennemäärä ja varausaste. Suomessa käytettävät LAM-pisteet on toteutettu kaksoissilmukoina, joiden avulla saadaan mitattua myös ajoneuvon nopeus ja pituus. LAM-piste havaitsee ajoneuvon ohituksen ja tallentaa tiedon ajoneuvon ohitusajasta, ajosuunnasta ja kaistasta sekä nopeudesta ja ajoneuvotyyppistä. Esimerkki LAM-pisteen tuottamasta mittaustiedosta on esitetty taulukossa 3. Laitteet pystyvät myös summaamaan tiedon eri aikajaksoilta (esim. 5 min keskiarvo). Tällä hetkellä LAM-pisteestä tulevaa ajoneuvokohtaista tietoa ei viedä sellaisenaan ajantasaiseen tietokantaan, vaan tieto summataan ja luokitellaan ennen tallennusta. Nykyinen liikennetilannetiedotus perustuu näihin summattuihin tietoihin. LAM-pisteitä voidaan kuitenkin hyödyntää myös ajantasaisessa liikenteen seurannassa. Nykyisin LAM-pisteiden välimatkat ovat maksimissaan useita kymmeniä kilometrejä ja tiheimmilläänkin LAM-pisteitä on muutaman kilometrin välein. (Airaksinen ja Ellmén 2003, Tiehallinto 2001.)

Taulukko 3. Esimerkki LAM-pisteen tuottamasta mittaustiedosta.

vuosi päivä tunti min sek 0.01sek pituus kaista suunta ajontyyppi
nopeus

03	93	12	25	14	90	32	2	1	1	88
03	93	12	25	19	67	92	5	2	3	72
03	93	12	25	20	36	36	2	1	1	82
03	93	12	25	34	32	38	6	2	1	85
03	93	12	25	37	26	38	5	2	1	84

Seuraavassa esitettävät tiedot LAM-pisteen ilmaisutarkkuudesta perustuvat Tiehallinnon liikennetietokoordinaattori Reijo Prokkolan ja liikenteen auto-maattisen mittauksen järjestelmävastaavan Marja Viirin haastatteluihin.

LAM-pisteen ilmaisutarkkuus on varsin hyvä ilmaisimen ollessa kunnossa. Vuonna 2002 koko maassa saadusta noin 650 miljoonasta havainnosta jouduttiin eri syistä ennen tietokantaan vientiä hylkäämään 6,5 miljoonaa kappaletta eli yksi prosentti. Joillakin LAM-pisteillä hylättyjen havaintojen osuus on muutaman prosentin (1-5 %) luokkaa. Suurin osa hylkäyksistä johtui väärin mitatusta nopeudesta (mittaustulos joko alle 1 km/h tai yli 199 km/h). Muita syitä havainnon hylkäämiseen ovat virhe ajoneuvon pituudessa, tyypissä, kaistassa tai kellonajassa. Virheellisten havaintojen lukumäärään vaikuttaa eniten liikennevirran nopeus. Nopeuden ollessa 10–20 km/h mittaustarkkuus pysyy vielä hyvänä, mutta tätä alhaisemmillä nopeuksilla virheellisten havaintojen osuus kasvaa.

Tiehallinnon vuonna 2003 tekemässä selvityksessä tutkittiin nykyisten käytössä olevien LAM-pisteiden toimivuus ajoneuvoluokittelun ja liikennemäärätiedon osalta yksiajorataisilla teillä. Tutkimuksessa toteutetuissa laskennoissa keskimääräiset laskentatarkkuudet erityyppisillä laitteilla olivat DSL3: 98,5 %, DSL4: 99,3 % ja DL4: 100,0 % (Saastamoinen 2003.) Tiehallinnon on tarkoitus toteuttaa lisää tarkistuslaskentoja ja korjata DSL-laitteissa havaitut puutteet.

Havainnon ollessa virheellinen ajoneuvo tuottaa ilmaisun, mutta jokin tieto jää saamatta. Näitä virheellisiäkin havaintoja voidaan kuitenkin käyttää liikennemäärää laskettaessa. Ajoneuvoista jää arviolta reilusti alle yksi prosentti kokonaan havaitsematta. Kunnossa oleva LAM-piste ei tuota ylimääräisiä havaintoja, vaan virheiden takia liikennemäärää aliarvioidaan.

2.2.2 Liikennevaloista saatavat tiedot

Tämä luku perustuu DI Jari Oinaksen haastatteluun sekä vierailuihin Peek Trafficissa ja Siemensillä.

Liikennevalo-ohjauksisissa liittymissä on runsaasti ilmaisimia, joiden avulla liikennevalojen toimintaa säädetään. Ilmaisimina käytetään useimmiten induktiosilmukoita; myös mikroaaltotutkia ja infrapunailmaisimia on jonkin verran käytössä. Induktioilmaisimet on yleensä sijoitettu sekä juuri ennen pysäytysviivaa että liittymän tulohaaroille n. 30–120 m päähän pysäytysviivasta riippuen nopeusrajoituksesta sekä liikenneympäristöstä. (Tielaitos 1996.)

Liikennevalojärjestelmien avulla olisi periaatteessa mahdollista kerätä liikennemäärä-, varausaste- ja aikavälitietoa eri aikarastereilla, mutta ongelmana on tällä hetkellä tiedonsiirto sekä ohjauskojeiden ja liikennevalojärjestelmien rajapinnat. Nykyisin liikennevaloista voitaisiin hyödyntää liikennemäärätietoa. Tieto on saatavissa liittymän ohjauskojeelta tai liikennevalojen valvontajärjestelmän tietokoneelta.

Liikennevalojen keräämiä liikennetietoja ei ole juurikaan käytetty muuhun kuin liikennevalojen oman toiminnan säätämiseen sekä tilastollisen seurannan tarpeisiin. Monet liikenteen hallinnan järjestelmät voisivat kuitenkin hyö-

dyntää liikennevaloilla kerättävää ajantasaista tietoa. Onkin odotettavissa, että tulevaisuudessa liikennevalojen avulla saadaan nykyistä ajantasaisempaa ja monipuolisempaa tietoa.

Useimmat liikennevalot on nykyisin liitetty liikennevalojen käyttö- ja valvontajärjestelmään, jolla seurataan ja valvotaan liikennevalojen toimintaa (vikatilanteet ja ohjelmanvaihdot jne.) ja kerätään melko usein myös liikennemäärätietoa. Valvontatiedot ja liikennemäärätiedot tallennetaan tietokantoihin. Ohjauskoje, joka on liitetty järjestelmään kiinteällä yhteydellä, lähettää liikennemäärätiedot valvontajärjestelmään 15 minuutin välein. Tiedonsiirtoviive on maksimissaan muutaman minuutin luokkaa, minkä jälkeen tiedot ovat välittömästi käytettävissä. Liikennevalokoje, jota ei ole liitetty valvontajärjestelmään kiinteällä yhteydellä, tallentaa liikennemäärätiedot omaan puskuri-muistiinsa ja lähettää tiedot valvontajärjestelmään yleensä kerran vuorokaudessa. Liikennemäärätiedot voidaan kuitenkin hakea kojeelta useamminkin.

Liikennevalokoje mittaa kojetyypistä riippuen jatkuvasti myös keskimääräisiä aikavälejä, keskimääräistä varausastetta sekä nopeuksia (joiden mittaamiseen tarvitaan kaksi lähekkäistä silmukkaa). Koje ei kuitenkaan tallenna näitä tietoja eikä niitä välitetä valvontajärjestelmään eikä niin näin ollen saada helposti siirrettyä ulkopuoliseen järjestelmään. Mikäli kojeessa on liikenneohjauksinen ohjelmanvaihto, voidaan nämäkin tiedot saada käyttöön. Liikenneohjauksista ohjelmanvaihtoa käytetään Suomessa kuitenkin erittäin vähän.

Yksittäisiä, ajoneuvokohtaisia ilmaisuja on nykyisin hyvin hankalaa ellei mahdotonta "kaapata" kojeelta. Koje laskee ilmaisujen lukumäärää kumulatiivisesti laskuriin ja kun laskurin maksimiarvo saavutetaan, alkaa laskenta alusta. Koje ei tallenna ilmaisun kellonaikaa.

2.3 Tieosaseuranta

2.3.1 Matka-aikaseurannan erityispiirteet

Matka-aikojen seuranta on ajantasaista tieosaseurantaa, joka on ollut perinteisesti vähäistä. Seurantaan ei ole ollut luotettavia ja kustannustehokkaita järjestelmiä, jotka kykenisivät seuraamaan liikennettä itsenäisesti. Suomessa on ollut ajantasaista matka-aikojen seurantaa vuodesta 1999 lähtien. (Eloranta 1999.)

Tieosaseuranta, jolla mitataan matka-aikoja, perustuu ajoneuvon tai jonkin ajoneuvon mukana liikkuvan laitteen tunnistamiseen ja ohitusajan rekisteröimiseen kahdessa eri mittauspisteessä. Matka-aika lasketaan näiden ohitusajankohtien erotuksena. (Eloranta 1999.)

Ajoneuvojen havaitsemiseen on Suomessa käytetty kahta eri tekniikkaa: rekisteritunnuksen automaattisesti tunnistavia kameroita ja matkapuhelinpaikannusta. Matkapuhelinpaikannuksessa tunnistetaan ajoneuvossa oleva matkapuhelin kahdessa tai useammassa ja mitataan aika, joka puhelimella (autolla) on kestänyt kulkea pisteestä toiseen. Matkapuhelinpaikannukseen perustuva matka-aikojen mittaus on Suomessa vasta kokeiluasteella. On arvioitu, että luotettava arvio tiejakson matka-ajasta saadaan jo, kun ajoneuvo-

jen matka-ajoista saadaan mitattua 5–10 %, koska suuri osa liikennevirrasta käyttäytyy hyvin samankaltaisesti. (Eloranta 1999, Kummala 2002.)

Matka-aikojen ajantasaisesta seurannasta saadaan liikenteen hallintaa varten mittaustietoa matka-ajasta ja -nopeudesta mittauspisteiden välillä. Liikennemäärää tai -tiheyttä ei matka-aikamittausjärjestelmien avulla saada, koska järjestelmät eivät havaitse kaikkia tiejaksolla liikkuvia ajoneuvoja. Matka-aikatietojen hyödyntämistä heikentää se, että mittaustieto matka-ajasta saadaan vasta, kun ajoneuvot poistuvat seurantajaksolta. Tiejaksolle tulevien tai sillä jo olevien ajoneuvojen matka-aika saattaa poiketa viimeisimmästä saadusta mittauksesta merkittävästikin. Ruuhkan alkaessa matka-aikatieto on liian optimistista ja kasvaa vasta ensimmäisten ruuhkassa ajaneiden ajoneuvojen ohittaessa seurantajakson päätepisteen. Mitä enemmän matkanopeus laskee tai mitä pidempi seurantajakso on, sitä enemmän matka-aikatieto viivästyy. Vastaavasti ruuhkan purkautuessa tiejaksolle tulevien tai sillä liikkuvien ajoneuvojen matka-aika on lyhyempi, kuin ruuhkaliikenteestä mitattu matka-aika. (Eloranta 1999, Tiehallinto 2001.)

2.3.2 Rekisterikilpien tunnistamiseen perustuva matka-aikaseuranta

Matka-aikojen mittaamiseen on Suomessa käytetty on rekisterikilpien tunnistamista tähän tarkoitukseen soveltuvien infrapunakameroiden ja kuvantulkintatekniikan avulla. Järjestelmä etsii kuvasta ajoneuvon rekisterikilven, tulkitsee tunnuksen ja tallentaa sen yhdessä ohitusajankohdan kanssa. Rekisterikilpien tunnistamiseen perustuvan matka-aikamittauksen selkeimpänä etuna on järjestelmän automaattinen toiminta ja matka-aikamittaukseen käytettävän otoksen riittävän suuri koko. Tieto saadaan automaattisesti elektroniseen muotoon ja sitä voidaan hyödyntää muissa järjestelmissä lähtötietona. (Eloranta 1999.)

Rekisterikilpien tunnistamiseen liittyy useita järjestelmän ulkoisista tekijöistä aiheutuvia ongelmia, jotka saattavat huonontaa rekisterikilpien tunnistusasetta tai lisätä virheellisten havaintojen määrää ja näin huonontaa matka-aikatiedon luotettavuutta. Näitä tekijöitä ovat mm. valaistus, sää ja keli (huonolla kelillä rekisterikilvet saattavat olla likaisia tai lumen peitossa) sekä matalalta ja kirkkaasti paistava aurinko. Lisäksi rekisterikilpien tunnistamisen onnistumiseen vaikuttaa mm. kameran suuntaaminen, kameroiden määrä ja kuvaussuunta. (Eloranta 1999.)

Suomessa matka-aikoja seurataan rekisterikilpien tunnistamiseen perustuvalla menetelmällä Espoossa ja Helsingissä Kehä I:llä ja valtateillä 1 ja 4 sekä Lahden ja Heinolan välillä valtatiellä 4. Lisäksi järjestelmä ollaan rakentamassa valtatie 7:lle Vaalimaan raja-asemalle johtavalle tieosuudelle (Luoma ja Karhumäki 2002). Lahti–Heinola-väli jakautuu kolmeen eri seurantajaksoon, joiden matka-aikoja mitataan myös erikseen. Matka-aikojen havaintoarvoina käytetään viimeisen 10 minuutin aikana mitattujen ajoneuvokohdistaisten matka-aikojen mediaania. (Tielaitos 2000, Innamaa ym. 2002.)

Valtatiellä 4 matka-ajoista tiedotetaan tienkäyttäjille tien varressa olevilla muuttuvilla informaatiotauluilla. Informaatiotaululla esitetään matka-ajan ala-

ja yläarvot minuutteina. Liikennekeskukseen matka-aikahavainnot saadaan viiden minuutin välein. (Tielaitos 2000, Innamaa ym. 2002.)

Pääkaupunkiseudulla matka-ajoista ei tiedoteta tienkäyttäjille, vaan matka-aikaseurantaa hyödynnetään ainoastaan liikennekeskuksessa. Tiejakson matka-aikaestimaattina käytetään viimeisten 30 matka-aikahavainnon perusteella laskettua mediaania. Laskentaan käytettävien havaintojen yläikärajaksi on kuitenkin määrätty 10 minuuttia, eikä tätä vanhempia havaintoja käytetä. Kun liikenne on hiljaista tai tunnistusaste huono, mediaanimatka-aika saatetaan siis laskea alle 30 havainnosta. Mitatusta matka-aikaestimaatista saadaan laskettua keskimääräinen matkanopeus kameravälillä. Tätä verrataan vapaassa liikennetilanteessa kyseisellä kameravälillä mitattuun matkanopeuteen. Toteutuneen ja vapaan virran matkanopeuksien ero kertoo vallitsevasta liikennetilanteesta. (Tämän kappaleen tiedot perustuvat vierailuun Tiehallinnon liikennekeskuksessa.)

2.3.3 Matkapuhelinpaikannukseen perustuva matka-aikaseuranta

Tiehallinto on teettänyt esiselvityksen matkapuhelinpaikannuksen hyödyntämisestä liikennetietojen keruussa (Kummala ym. 2001). Matkapuhelinpaikannuksesta on lisäksi tehty pilottitutkimus Kehä I:llä ja valtatiellä 4 välillä Lahti-Heinola. Tutkimuksissa on käynyt ilmi, että matkapuhelinpaikannus on varteenotettava vaihtoehto matka-aikojen seurannassa. (Kummala 2002.)

Matkapuhelinpaikannus perustuu siihen, että päällä oleva matkapuhelin kuuluu aina jonkin tukiaseman piiriin ja tiettyä reittiä kulkeva matkapuhelin vaihtaa tukiasemaa aina lähes samassa pisteessä. Matkapuhelimen saapuminen tietyn tukiaseman alueelle voidaan havaita ja puhelin voidaan varustaa seurantajärjestelmän antamalla anonyymillä tunnisteella. Tunnisteen avulla saadaan selville, milloin sama puhelin tulee toisen, seurannan kannalta mielenkiintoisen tukiaseman piiriin. Näistä havainnoista voidaan laskea matka-aika ja -nopeus kahden sijainniltaan tunnetun pisteen välillä. (Kummala 2002, Luoma ja Karhumäki 2002.)

Merkittävin matkapuhelinpaikannuksen etu on sen kyky tuottaa matka-aikahavainnot ympäristöllisistä ja liikenteellisistä olosuhteista riippumatta. Matkapuhelinverkkoa tukiasemineen ei kuitenkaan ole alunperin suunniteltu matka-aikojen seurantaan, joten tukiasemien sijainti ei välttämättä ole matka-aikojen seuraamisen kannalta optimaalinen. Koska järjestelmä on riippumaton tienvarren infrastruktuurista, on seurantajaksojen laajentaminen tai siirtäminen kohtalaisen helppoa. Lyhyiden (< 3–5 km) tarkastelujaksojen toteuttaminen on kuitenkin vaikeaa. (Kummala 2002, Kummala ym. 2001.)

Matkapuhelimiin perustuvaan matka-aikojen seurantaan aiheuttavat ongelmia sellaiset puhelimet, jotka ovat liikkuneet esim. tarkasteltavan tien rinnakkaistiellä, pyörätiellä tai joukkoliikennevälineissä. Mikäli havaintoaineistosta pystyttäisiin erottamaan rinnakkaistien matka-aikamittaukset, olisi järjestelmällä mahdollista hoitaa kahden tieosuuden yhdenaikainen matka-aikaseuranta kustannustehokkaasti. Tämä olisi myös selkeä lisäarvo sujuvuustiedotuspalvelulle. Liikennettä voitaisiin ohjata vaihtoehtoiselle reitille silloin, kun se on tarkoituksenmukaista. (Kummala 2002.)

Matka-aikojen seuranta matkapuhelinpaikannuksen avulla soveltuu parhaiten käytettäväksi pääteiden runkoverkon kohteissa, joissa seurantajakso on pitkä (n. 10 km) ja tiejaksolta poistuvia, sille tulevia ja pysähtyviä ajoneuvoja on vähän. Taajamissa seurannan etuna on suuri havaintomäärä, mutta havaintoja muualta kuin tarkasteltavalta tieltä kertyy paljon. Teknisesti on mahdollista muodostaa taajamissa 2,5–3 km ja muualla 2,5–5 km pituisia seurantajaksoja, mikäli tukiasemien sijainti mahdollistaa tällaisten seurantajaksojen muodostamisen. (Kummala 2002.)

Matkapuhelinpaikannus tuo liikenteen seurantaan myös mahdollisuuden seurata liikennettä aivan uusilla mitattavilla suureilla. Puhelin- ja puhelukasauksia voidaan mahdollisesti käyttää häiriöiden havaitsemiseen. Saattaa myös olla mahdollista, että matkapuhelinverkon tukiasemien puhelinhavaintomäärien muutoksia voitaisiin käyttää syötesuureina liikenteen ennuste- ja estimointimalleissa. (Kummala 2002, Kummala ym. 2001.)

2.4 Muut tiedot

2.4.1 Väyläohjausjärjestelmistä saatavat tiedot

Automaattisia liikenteenohjaus- ja informaatiojärjestelmiä käytetään liikenteen hallintaan erityisesti ruuhkaisilla väylillä parantamaan sujuvuutta ja liikenneturvallisuutta sekä vähentämään ympäristöhaittoja. Väyläohjausta saatetaan tarvita myös hankalien sää- ja keliolosuhteiden vaihteluiden takia. (Innmaa 1999.)

Liikenteenohjaus- ja informaatiojärjestelmät koostuvat kolmesta pääosasta. Mittausosa tekee havaintoja liikenteestä, tulkintaosa tulkitsee mittaustulokset nopeus-, aikaväli- ym. havainnoiksi. Informaatio- tai ohjausosa määrittelee vallitsevan liikennetilanteen ja valitsee kuhunkin tilanteeseen parhaiten sopivan ohjaus- tai informaatiovaihtoehdon. Järjestelmät sisältävät yleensä useita silmukkamaisimia, erilaisia kameroita sekä sään ja kelin mittauslaitteita. Useimmiten automaattisesti säädetään muuttuvia nopeusrajoituksia. (Innmaa 1999.)

Suomessa automaattisia väyläohjausjärjestelmiä on käytössä mm. ruuhkaisella Länsiväylällä, erikoiskohteissa kuten Kehä II:n tietunnelissa ja Kuopion pohjoispuolella Kallansilloilla, valtatiellä 7 (sääohjauksinen tie) sekä valtatiellä 1 välillä Lohjanharju–Sammatti. (Innmaa 1999.)

Valtatie 1:n järjestelmässä nopeusrajoituksia säädetään sään ja kelin sekä liikennetilanteen mukaan. Mittausjärjestelmä tuottaa tiedot liikennemäärästä, raskaiden ajoneuvojen määrästä, ilmaisimen varausasteesta, keskinopeudesta (henkilöautot ja raskas liikenne erikseen), aikaväleistä ja nopeuden keskihajonnasta. Tietojen määrittäminen tapahtuu ajosuunnittain ja eri mittausaikaväleillä. Järjestelmään voidaan asettaa mittausaikaväliksi 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min ja 5 min. Liikennetietojen lisäksi järjestelmä kerää tietoa säästä ja kelistä. Säättietoihin kuuluvat ilman lämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja sateen laatu. Kelitietoihin kuuluvat ajoradan pinnan lämpötila, ajoradan pinnan kunto, suolan jäänteet, sademäärä, jäätymispistelämpö-

tila, kastepistelämpötila, vesikalvon paksuus ja liukkauden ennakointitieto. (Bosch Signalbau Huber 1998.)

Länsiväylällä Helsingissä ja Espoossa on käytössä automaattinen ruuhkavaroitusta- ja kameravalvontajärjestelmä. Järjestelmällä säädetään nopeusrajoituksia sekä muuttuvia opasteita, joilla varoitetaan ruuhkasta, liukkaudesta ja tietöistä. Järjestelmän tarkoitus on parantaa liikenteen sujuvuutta ja turvallisuutta. Ruuhkavaroitusta informoi tienkäyttäjää ruuhkan alkamisesta ja jatkumisesta sekä jonon pään sijainnista. Nopeusrajoituksilla pyritään sovittamaan liikenteen nopeus kulloiseenkin liikennetilanteeseen sopivaksi. Seurantajärjestelmä koostuu induktiosilmukkailmaisimista ja liikennekameroista. Jonovaroitusnäyttöä ja muuttuvia nopeusrajoituksia ohjataan ohjelmalla, joka perustuu nopeuden seurantaan ja kiinteisiin kynnyksarvoihin. (Innamaa 1999.)

2.4.2 Sää- ja kelitiedot

Tiehallinto kerää yleisten teiden verkolla tietoja säästä ja kelistä noin 330 tiesääasemalla ja 220 (Luomalla) kelikameralla. Tiesääasemat mittaavat säästä ja keliä ja noin kolmasosassa asemista on anturit myös näkyvyyden, sademäärän ja sateen olomuodon tarkempaan mittaamiseen. Tiesääasemat on sijoitettu sään ja kelin kannalta kriittisiin paikkoihin ja ne sijaitsevat valtaosin päätieverkolla. Tiesääasemien sijoittelua tullaan kehittämään ja erityisesti kelikameroiden määrää lisätään. Oman tiedon tuottamisen lisäksi Tiehallinto hankkii satelliitti- ja tutkakuvia sekä sää- ja keliennusteita Ilmatieteen laitokelta ja Forecalt. (Lähesmaa ym. 2002.)

Tiesääasemien ja kelikamerajärjestelmän tietojen keräämiseen käytetään samaa järjestelmää. Tiesää tiedot kerätään 15–120 minuutin välien ja kelikuvat 30–120 minuutin välein. Talvella ja huonoissa olosuhteissa tietoja kerätään tiheämmin. Tietoja säästä ja kelistä käytetään talvikunnossapidon suunnitteluun ja hallintaan, liikennesään joukkotiedotukseen mm. radiossa ja internetissä sekä muuttuvien opasteiden automaattiseen ja manuaaliseen ohjaukseen. Muuttuvien opasteiden automaattisessa ohjauksessa käytetään hälytyksiä, joita saadaan tiesääjärjestelmästä tiettyjen olosuhteiden täytyessä. Osa tiesää tiedoista päivittyy automaattisesti Tiehallinnon palveluihin. Pääosin tietojen tuottaminen palveluihin tapahtuu kuitenkin liikennekeskuksissa manuaalisesti. Liikennesää luokitellaan joko normaaliksi, huonoksi tai erittäin huonoksi. (Lähesmaa ym. 2002.)

2.4.3 Tietyöt ja häiriöt

Suurimmalla osalla Suomen tieverkkoa sujuvuusongelmat eivät aiheudu suuresta liikennemäärästä vaan yllättävistä häiriöistä kuten onnettomuuksista ja erilaisista tapahtumista kuten tietöistä. Automaattiset häiriönhavainnointijärjestelmät ovat kalliita ja niitä käytetään vain erityiskohteissa (esim. tunneleissa). Pääsääntöisesti häiriöt havaitaan manuaalisesti ja ne tulevat Tiehallinnon tietoon poliisilta, hälytyskeskuksilta tai tienkäyttäjiltä. Manuaalisesti havaittu tieto varmistetaan aina yhteistyötahoilta tai liikennekameroilta. Varmennettua häiriötietoa voidaan käyttää liikenteen ohjauksen lähtötietona sekä liikennetiedotuksessa. (Airaksinen ja Ellmén 2003, Tiehallinto 2001.)

3 LIIKENNETILANTEEN ARVIOINTIIN SOVELTUVAT MENETELMÄT

3.1 Pistetietoon perustuvat menetelmät

3.1.1 Pistetiedon ominaisuuksia

Yksinkertaisimmillaan tielinkin sujuvuutta ja matka-aikaa voidaan arvioida pistemittautustietojen avulla. Tällä hetkellä liikenteen seuranta on valtaosin pisteseurantaa, joten liikennetilanteen päättely pistetietojen avulla on usein ainoa käytettävissä oleva menetelmä. Tulevaisuudessakin liikenteen seuranta painottunee pisteseurantaan ja siksi pistetiedon hyödyntäminen on tärkeää.

Pistenopeus eroaa yleensä tiejakson matkanopeudesta, mutta sitä käytetään sujuvuusarvioinneissa kuitenkin usein, koska sen mittaaminen on matkanopeuden mittaamista yksinkertaisempaa ja edullisempaa. Jos tiejakson nopeustaso on yhtenäinen, keskimääräiset pistenopeudet ovat keskimääräisiä matkanopeuksia korkeampia, paitsi siinä erikoistapauksessa, että kaikki ajoneuvot ajavat samaa nopeutta. Tämä johtuu siitä, että keskimääräisessä matkanopeudessa hitaasti liikkuvia ajoneuvoja painotetaan enemmän kuin keskimääräisessä pistenopeudessa, koska painottavana tekijänä on matka-aika eikä nopeus. Jos taas tiejaksolla on ruuhkaa, korkeammat pistenopeudet johtuvat yleensä siitä, ettei ruuhka kata koko tiejaksoa eikä ulotu pistemittausasemalle, mutta alentaa kuitenkin tiejakson kokonaismatkanopeutta. Näin käy esim. silloin, kun ruuhka on tiejakson lopussa (alavirrassa) ja pistemittausasema sijaitsee tiejakson alussa tai keskellä. Toisaalta, jos pistemittausasema sijaitsee juuri tiejakson ruuhkaisimmassa kohdassa, mitatut pistenopeudet ovat matkanopeuksia alhaisempia. (Innmaa 1999.)

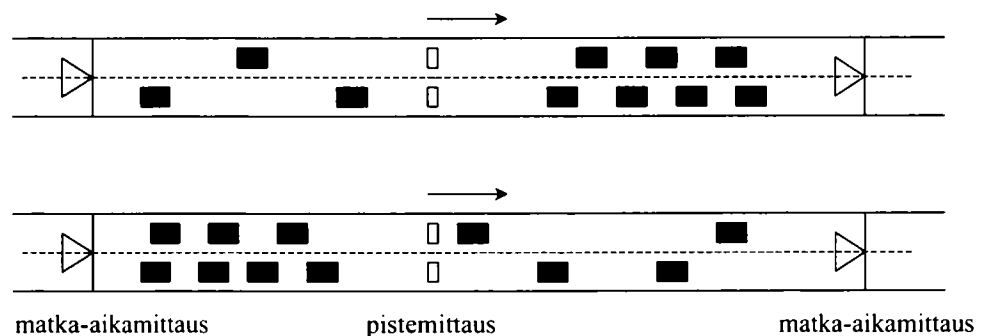
Norjassa on tutkittu piste- ja tieosatiedon välisiä eroja tiejaksolla, jonka pituus oli 33 km, ja jossa pistemittausasema sijaitsi tiejakson puolivälin tienoil-la. Tutkimuksessa havaittiin, että matkanopeus on stabiilimpi parametri kuin pistenopeus. Kun liikenteessä tapahtui häiriöitä, ajoneuvojen matkanopeuksien välillä oli vain vähän vaihtelua. (Innmaa 1999.)

Norjalaisen tutkimuksen koejaksolla ruuhka syntyi tavallisesti tiejakson loppupäähän ja näkyi ensimmäiseksi matkanopeuksien alentumisena. Ruuhkatilanteen jatkuessa pistenopeudetkin alkoivat laskea ja niiden vaihtelu kasvoi. Tämä viittasi siihen, että epävakaa liikennevirta oli saavuttanut pistemittausaseman. Pistenopeuksien keskiarvoa pienempi matkanopeus viittasi liikennevirran häiriöihin tiejakson loppupäässä. Pitkillä tiejaksoilla piste- ja matkanopeuksien välinen suhde riippuu voimakkaasti mittauspisteiden sijainnista. Mikäli liikennevirta on vapaata, pistenopeus voi joissain pisteissä olla matkanopeutta korkeampi ja joissain pisteissä puolestaan alhaisempi. (Innmaa 1999.)

Norjalaisessa tutkimuksessa havaittiin, että kun liikennevirta muuttui vakaasta epävakaaksi, matkanopeudet olivat pistenopeuksia korkeampia. Liikennevirran muuttuessa epävakaasta jälleen vakaaksi, olivat pistenopeudet puo-

lestaan matkanopeuksia alempia. Tämä voidaan selittää sillä, että tietyllä aikajaksolla ne ajoneuvot, joiden pistenopeus mitataan, ovat eri ajoneuvoja kuin ne, joita käytetään matkanopeuden määrittämiseen, koska matkanopeus saadaan mitattua vasta, kun ajoneuvot tulevat mittausjakson loppuun. (Innamaa 1999.)

Ilmaisinsijoittelulla on oma vaikutuksena matka- ja pistenopeusmittausten käyttäytymiseen. Norjalaisen tutkimuksen tiejaksolla pistemittausasema sijaitsi tiejakson keskellä. Suomessakin LAM-pisteet on tähän asti sijoitettu useimmiten liittymäväliden puolivälin tuntumaan. Norjalaisessa tutkimuksessa havaittiin, että liikennevirran häiriöt liikkuvat yleensä alavirrasta ylävirtaan eli tiejakson loppupäästä kohti alkuosaa. Tilannetta havainnollistetaan *kuvassa 6*. Kun ruuhka alkaa, ne ajoneuvot, joita käytetään matkanopeuden määrittämiseen, ovat saavuttaneet pistemittausasemasta alavirtaan olevan jonon. Pistenopeutta sen sijaan mitataan ajoneuvoilta, jotka ajavat vapaassa liikennevirrassa. Jos ruuhka on pitkäkestoinen, se ulottuu kestäessään pistemittausasemalta ylävirtaan. Tällöin ruuhkan purkautuessa matkanopeuden määrittämiseen käytetyt ajoneuvot kuuluvat pistemittausasemasta ylävirtaan olevaan jonoon. Molemmat tilanteet näkyvät pistenopeuksia alhaisempina matkanopeutena. (Innamaa 1999.)

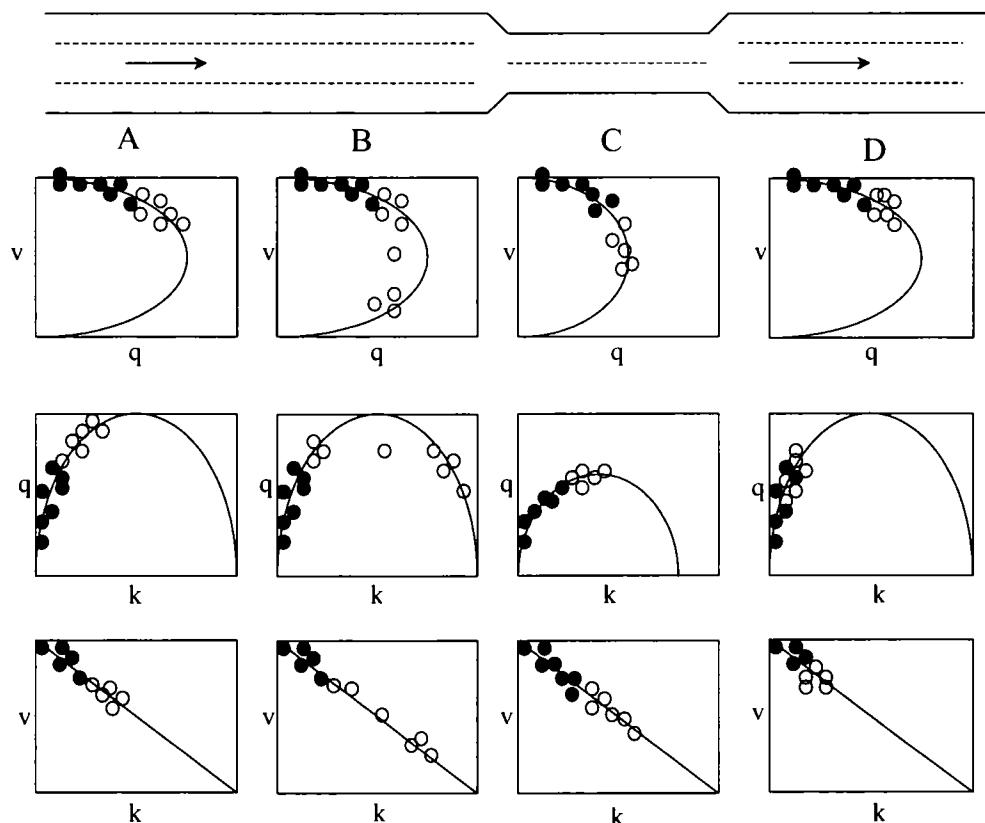


Kuva 6. Matkanopeuden ja pistenopeuden mittaaminen ruuhkan muodostuessa (yläkuva) ja purkautuessa (alakuva), kun pistemittausasema sijaitsee linkin puolessa välissä.

Koska pistemittauksen avulla voidaan seurata vain yhden poikkileikkauksen liikennetilannetta, mittauspisteiden tarkoituksenmukainen sijoittaminen on tärkeää. *Kuvassa 7* esitetään, miten liikennetilanne ja sitä myötä mittausu-lokset käyttäytyvät sen mukaan, miten mittauspiste sijaitsee pullonkaulaan nähden. *Kuvassa* on esitetty teoreettiset riippuvuudet nopeudelle ja liikennemäärälle, liikennemäärälle ja tiheydelle sekä liikennemäärälle ja tiheydelle tiejakson eri kohdista. Oletetaan ensin, että liikennemäärä on kohdan C pullonkaulan välityskykyä alempi (esim. kahden kaistan kapasiteetin suuruisen). *Kuvan 7* kuvaajissa näkyvät mustat pisteet vastaavat mittauspisteitä tässä tilanteessa. Oletetaan sitten, että liikennemäärä kasvaa pullonkaulan C kapasiteettia suuremmaksi (esim. 2,5 kaistan kapasiteettia vastaavaksi). Tämän tilanteen pisteet näkyvät *kuvassa 7* valkoisina pisteinä. (May 1990.)

Kohdassa A liikenne on vielä vapaata ja havaintopisteet asettuvat teoreettisille kuvaajille. Kohta B sijaitsee välittömästi ennen pullonkaulaa. Kun liikennemäärä ei ylitä C:n kapasiteettia, havainnot B:n mittauspisteillä vastaavat havaintoja kohdassa A. Kun liikennemäärä kasvaa pullonkaulan välityskyvyn yli, vaikutus havaitaan myös kohdassa B. Liikennemäärä poikkileikkaukses-

sa B on sama kuin pullonkaulassa C. Nopeus laskee ja liikennetiheys kasvaa. B:n koko kapasiteetti ei tule käyttöön, koska sitä rajoittaa pullonkaula C. Tämä näkyy siinä, että nopeus-liikennemäärä -kuvaajassa ei ole havaintopisteitä kapasiteettia vastaavalla liikennemäärällä, vaan vapaasta liikennetilanteesta siirrytään suoraan ruuhkaan. Pullonkaulan C kohdalla liikennemäärä ruuhkatilanteessa vastaa kapasiteettia. Poikkileikkauksessa D ruuhkaa ei havaita, koska pullonkaula pystyy välittämään liikennemäärän, joka on kohdan D välityskykyä selkeästi pienempi. (May 1990.)



Kuva 7. Mittauspisteen sijainnin vaikutus mittaustuloksiin (May 1990).

3.1.2 Pistetiedon yleistäminen tiejaksolle – Gardermoen

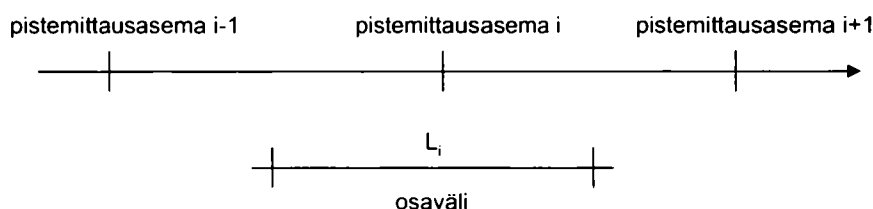
Norjassa annetaan liikennetilannetiedotusta Oslost Gardermoenin lentokentälle vievällä tiellä. Koko tiejakso Oslo–Gardermoen on 49 km pitkä ja matka-aika vapaassa liikennetilanteessa on noin 36 minuuttia. Pistemittausasemat sijaitsevat tiellä 800–4650 m välein. Liikenteen seurantaan käytetään sekä videoilmaisimia (CCATS eli Camera and Computer Aided Traffic Sensor) että silmukkoilmaisimia. Lisäksi lähes koko tiejakso on varustettu ITV-videokameroilla, jotka välittävät kuvaa tiejakson oloista liikennekeskukseen. ITV-kameroita käytetään sääolojen seurantaan ja mittaustiedon varmistamiseen. Liikenteen seurantarjestelmä kerää tietoa liikennemäärästä, keskinopeudesta ja ilmaisimen varausasteesta. Tiedot lähetetään keskusjärjestelmään 5 minuutin välein. (Norwegian Public Roads Administration 1999.)

 LIIKENNETILANTEEN ARVIOINTIIN SOVELTUVAT MENETELMÄT

Liikennetilanteen ja matka-ajan arvioimiseksi on testattu erilaisia algoritmeja ja huomattu, että monimutkainen algoritmi ei välttämättä johda yksinkertaisia algoritmeja tarkempiin matka-aikaestimaatteihin. Nykyisin käytettävä menetelmä onkin hyvin yksinkertainen. Algoritmin lähtötietoina käytetään pistemittausasemilla mitattua liikennemäärää ja keskinopeutta. Liikennettä lasketaan ajoneuvoluokittain ja kaistoittain, joten kokonaisliikennemäärän saamiseksi havainnot summataan. Tiejakso on jaettu osaväleihin siten, että kullakin osavälillä on yksi pistemittausasema. Osavälin määrittästä on havainnollistettu kuvassa 8. Osavälin pituus määritellään seuraavasti:

$$L_i = \frac{1}{2}(L_{i-1,i} + L_{i,i+1})$$

missä L_i osavälin i pituus
 $L_{i-1,i}$ pistemittausasemien $i-1$ ja i välinen etäisyys
 $L_{i,i+1}$ pistemittausasemien i ja $i+1$ välinen etäisyys



Kuva 8. Osavälin määritelmä Gardermoenin tiejaksolla (Norwegian Public Roads Administration 1999).

Laskennallinen matka-aika osavälillä i saadaan käyttämällä pistenopeuksia matkanopeutena. Kaistojen pistenopeuksia painotetaan niiden liikennemäärillä.

$$T_i^{lask}(t) = \frac{L_i \sum_{j=1}^l \frac{q_{i,j}(t)}{v_{i,j}(t)}}{\sum_{j=1}^l q_{i,j}(t)}$$

missä $T_i^{lask}(t)$ laskennallinen matka-aika ajanhetkellä t
 L_i osavälin pituus
 $v_{i,j}(t)$ keskinopeus kaistalla j osavälillä i ajanhetkellä t
 $q_{i,j}(t)$ liikennemäärä kaistalla j osavälillä i ajanhetkellä t
 l kaistojen lkm

(SINTEF 1998.)

Tämä on teoreettinen matka-aika (instantaneous travel time), jonka laskennassa oletetaan, että liikennetilanne osavälillä pysyy samana koko ajoneuvon matka-ajan ajan. Todellisuudessa liikennetilanteet muuttuvat eikä laskennallinen matka-aika vastaa ajoneuvojen todellista matka-aikaa osavälillä.

Laskennallista matka-aikaa tasoitetaan, jotta vältettäisiin matka-aika-arvion liiallinen vaihtelu aikavälistä toiseen. Laskennallisen matka-ajan käsittelyyn

on ehdotettu liukuvaa keskiarvoa, painotettua liukuvaa keskiarvoa, eksponentiaalista tasoitusta ja kaksinkertaista eksponentiaalista tasoitusta. Käsittelemenetelmäksi valittiin eksponentiaallinen tasoitus. Sen katsottiin sopivan parhaiten tavoitteeseen antaa tiedotusta liikenteen sujumisen ongelmista mahdollisimman nopeasti ongelmien alettua. Eksponentiaallinen tasoitus reagoi lähtötietona käytettävän pistetiedon muuttumiseen suhteellisen nopeasti. Huonona puolena on se, että estimaatti saattaa reagoida sellaiseen pistetiedon muutokseen, jolla ei ole vaikutusta tieosakohtaiseen tietoon. (SINTEF 1998.)

Lopullisen matka-aikaestimaatin laskentaan voidaan vielä käyttää korjauskerrointa k :

$$T_i(t) = T_i^{lask}(t) \cdot k$$

Korjauskerrointa k voidaan käyttää säätämään pistenopeus paremmin matkanopeutta vastaavaksi. Kun sujuvuus on hyvä, pistenopeus on matkanopeutta korkeampi. Pistenopeus voi myös olla matkanopeutta alempi tai nopeudet voivat olla hyvin lähellä toisiaan. (SINTEF 1998.)

Koko tiejakson laskennallinen matka-aika saadaan yksinkertaisesti summaamalla osavälien matka-ajat:

$$T_s^{lask} = \sum_{i=1}^N T_i^{lask}(t)$$

missä	$T_s^{lask}(t)$	koko tiejakson laskennallinen, summattu matka-aika
	$T_i(t)$	osavälin i matka-aikaestimaatti ajanhetkellä t
	N	osavälien lukumäärä

Jälleen on huomattava tämän olevan teoreettinen matka-aika, joka ei vastaa ajoneuvojen todellista matka-aikaa koko tiejaksolla, koska liikennetilanne muuttuu ajoneuvojen ollessa matkalla.

Eksponentiaalista tasoitusta käytetään myös koko tiejakson matka-aikaestimaatin laskemiseen. (SINTEF 1998.)

Estimoitujen matka-aikojen lisäksi tienkäyttäjille kerrotaan, miten liikennetilanne on kehittymässä. Matka-aika voi joko kasvaa, pysyä stabiilina tai laskea. Liikennetilanteen määrittämällä olevan muuttumassa, jos matka-aika eroaa yli 10 % kolmen edellisen aikavälin matka-ajan keskiarvosta. Suuntaus määritetään seuraavasti:

Matka-aika on stabiili, jos kahdella peräkkäisellä aikavälillä:

$$-0,1 < \frac{\bar{T} - T(t)}{\bar{T}} < 0,1$$

Matka-aika on kasvamassa, jos kahdella peräkkäisellä aikavälillä:

$$\frac{\bar{T} - T(t)}{\bar{T}} \leq 0,1$$

Matka-aika on laskemassa, jos kahdella peräkkäisellä aikavälillä:

$$\frac{\bar{T} - T(t)}{\bar{T}} \geq 0,1$$

Edellä \bar{T} matka-ajan keskiarvo kolmella edellisellä aikavälillä
 $T(t)$ matka-aika ajanhetkellä t

Internetissä esitetään tiejakson liikenteestä ajantasaista informaatiota, jota päivitetään 5 minuutin välein. Tiedotusta annetaan matka-ajasta, tilanteen muutossuunnasta, viivytyksistä, jonoista, vaihtoehtoisista reiteistä, häiriöistä sekä matka-ajoista normaalitilanteessa. Liikennetilanne esitetään lisäksi värikoodatulla kartalla. Luokitus on kolmiportainen ja perustuu matkanopeuteen. Luokitus, jota käytetään, kun nopeakrajoitus on 70 km/h tai enemmän, on seuraava

PUNAINEN	suuria viivytyksiä, nopeus 0-45 km/h
KELTAINEN	pieniä viivytyksiä, nopeus 45-70 km/h
VIHREÄ	ei viivytyksiä, nopeus yli 70 km/h

Mikäli ajantasaista mittaustietoa ei ole saatavilla, on värikoodi harmaa. Käytölle mittaustiedolle on määritetty ylä- ja alarajat. Jos mittaustulos poikkeaa näistä rajoista, tiedon katsotaan olevan virheellistä. (Norwegian Public Roads Administration 1999.)

3.1.3 Matka-ajan arvioiminen pistemittaustiedon avulla

Seuraavassa esitetään tapoja määrittää liikennevirran matka-aika pistemittauksesta saatavan tiedon avulla.

Ajoneuvojen tunnistaminen niiden "sormenjälkien" perusteella

Ylittäessään induktioilmaisimen ajoneuvo aiheuttaa ilmaisimen magneettikenttään muutoksen, joka voidaan havaita silmukan induktanssin muutoksina, jotka vaihtelevat ajoneuvosta toiseen. Tunnistamalla eri ajoneuvojen aiheuttamia induktioprofiileja eli ajoneuvojen "sormenjälkiä" voidaan matka-aikaa mitata havaitsemalla saman ajoneuvon ylitysaika ylä- ja alavirran ilmaisimella. Menetelmän ongelmana on mittauslaitteistosta johtuva saman ajoneuvon tuottama erilainen signaali eri mittauspisteissä. Myös ajoneuvon nopeus induktiosilmukan kohdalla vaikuttaa ajoneuvon sormenjälkeen. (Westerman 1995.)

Toinen vaihtoehto on tunnistaa eri mittauspisteillä yksittäisten ajoneuvojen sijaan ajoneuvoryhmiä. Ylävirran ilmaisimella seurataan jatkuvasti ajoneuvoryhmien aiheuttamia induktioprofiileja. Kun alavirran mittauspisteellä havaitaan tarpeeksi ylävirran induktioprofiilia muistuttava mittaustulos, voidaan ajoneuvoryhmän olettaa saavuttaneen tiejakson loppupään. Ajoneuvoryhmiä

tunnistava menetelmä ei ole niin herkkä yksittäisille mittausvirheille. Ongelmia tulee liikennevirran koostumuksen muuttuessa nopeuden vaihtelujen, ohitusten ja kaistan vaihtojen takia. Etenkin ramppien tuntumassa liikennevirran koostumus muuttuu, mikä vaikeuttaa ajoneuvoryhmien uudelleentunnistamista. Sormenjälkien tunnistamiseen perustuvat menetelmät soveltuvat ainoastaan lyhyille (alle 5 km) välimatkoille. (Westerman 1995.)

Ruuhkan alkaminen voidaan havaita peräkkäisten induktiosilmukoiden avulla myös etsimällä yksittäisen ajoneuvon induktioprofilia jälkimmäisellä mittausasemalla tietyssä aikaikkunassa, joka vastaa vapaan virran matka-aikaa. Mikäli ajoneuvo löytyy, liikenne ei ole ruuhkautunut ja matka-aika on ennalta määritetty vapaan virran matka-aika. Jos ajoneuvoa ei havaita tietyssä ajassa, voidaan tulkita liikenteen olevan ruuhkautunut. Ruuhkan alkamista etsitään laskemalla liukuvaa keskiarvoa havaittujen ja havaitsematta jääneiden ajoneuvojen määrästä. Tulosta voidaan parantaa suodattamalla virrehavaintoja sen perusteella, kuinka monta havaitsematonta tapausta kutakin havaintoa edeltää. Vapaissa oloissa havaintoja on paljon ja ruuhkassa vähän. Ruuhkan alkamista ja ruuhkanopeuksia voidaan mitata tehokkaammin määrittämällä useita aikaikkunoita, joissa ajoneuvoja etsitään. Sen perusteella, mihin aikaikkunaan havainnot sopivat, voidaan päätellä ruuhkan aste sekä matka-aika. (Coifman 2001.)

Nopeudet ja liikennemäärät tiejakson alussa ja lopussa

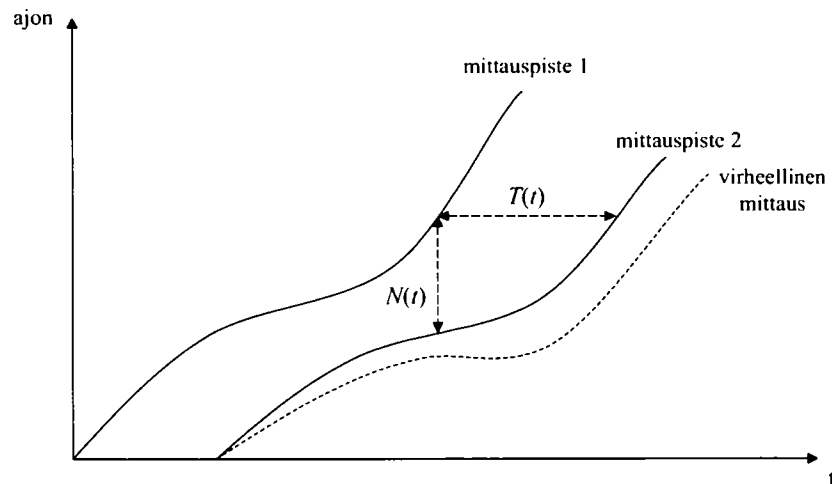
Tiejakson matka-aika voidaan arvioida tiejaksolle tulevan ja siltä poistuvan liikenteen pistenopeuksia mittaamalla. Tällöin oletetaan, että autot ajavat tiejakson alussa mitattua nopeutta jakson puoliväliin ja muuttavat siellä nopeutensa tiejakson loppupäässä mitatuksi nopeudeksi. Menetelmä antaa tarpeeksi tarkan tuloksen myös ruuhkaliikenteessä, kun tiejakso on tarpeeksi lyhyt (alle 1 km). (Westerman 1995.)

Toinen vaihtoehto on käyttää liikennemäärän ja nopeuden osamäärää, jolloin saadaan määritettyä paikallinen liikennetiheys sekä tiejakson alku- että loppupäässä. Kun liikennetilanne on vapaa, voidaan mitatun nopeuden ja liikennemäärän olettaa kuvaavan koko tiejakson tilannetta. Tiejakson keskimääräinen liikennetiheys lasketaan tiejakson alussa ja lopussa laskettujen liikennetiheyksien keskiarvona. Ajoneuvojen lukumäärä tiejaksolla saadaan kertomalla keskimääräinen liikennetiheys (ajon/km) tiejakson pituudella (km). Tiejaksolla olevien ajoneuvojen lukumäärää päivitetään lisäämällä alkuarvoon tiejaksolle tulevien ja siltä poistuvien ajoneuvojen erotus. Matka-aika arvioidaan jakamalla tiejakson ajoneuvomäärä (ajon) tiejakson lopussa mitatulla liikennemäärällä (ajon/h). (Westerman 1995.)

Molemmat menetelmät sopivat parhaiten lyhyille tiejaksoille (alle 1 km). Jälkimmäinen menetelmä on altis mittausvirheille, koska jos osa ajoneuvoista jää havaitsematta, virhe ajoneuvojen lukumäärässä kumuloituu nopeasti. (Westerman 1995.)

Kumulatiiviset jakaumat

Matka-aika voidaan arvioida vertaamalla peräkkäisten mittauspisteiden kumulatiivisia ajoneuvojen saapumisista tehtyjä jakaumia ja määrittämällä aika, jolla jakaumat ovat mittauspisteiden välillä siirtyneet. Menetelmän huonona puolena on matka-aika-arvioon kertyvä virhe, jos osa ajoneuvoista jää havaitsematta. Peräkkäisten mittauspisteiden välillä olevan ajoneuvomäärän ja matka-ajan arviointia on havainnollistettu kuvassa 9. Ongelmaa voidaan yrittää korjata seuraamalla ajoneuvotyyppien frekvenssiä ja havaitsemalla tätä kautta mittausvirheet. (Westerman 1995.)



Kuva 9. Kumulatiivisten ajoneuvolaskentojen käyttö matka-ajan laskennassa. $N(t)$ on mittauspisteiden välillä olevien ajoneuvojen lukumäärä ajanhetkellä t ja $T(t)$ on matka-aika ajanhetkellä t . (Papageorgiou 2003.)

Liikennemäärien välinen korrelaatio

Vapaassa liikennetilanteessa matka-aika voidaan määrittää tarkastelemalla kahdella mittauspisteellä mitattuja liikennemääriä. Ylävirran mittauspisteellä mitataan ajassa Δt tietty liikennemäärä q . Tätä liikennemäärää etsitään alavirran mittauspisteen mittaustuloksista. Kun liikennemäärä q havaitaan alavirran mittauspisteellä ajan $\Delta t + T$ kuluttua, voidaan matka-ajan mittauspisteiden välillä päätellä olevan T . (Westerman 1995.)

Menetelmää voidaan käyttää vain, jos mittauspisteiden välillä ei ole poistumis- tai liittymispaikkoja. Mittauspisteiden välimatkan tulee olla tarpeeksi lyhyt, jotta liikennemäärien korrelaatio ylä- ja alavirran ilmaisimilla on olemassa. Ruuhkatilanteessa liikennemäärien korrelaatio häviää, joten korrelaation olemassaolo kertoo myös suoraan liikennetilanneluokasta. Ruuhkassa matka-aikaa ei saada määritettyä liikennemäärien korrelaation perusteella. Matka-aika voidaan tällöin kuitenkin estimoida käyttämällä determinististä jonomallia. Tällaista menetelmää on tutkittu GERDIEN-projektissa ja tulokset olivat lupaavia. (Westerman 1995.)

3.2 Yksinkertainen makroskooppinen liikennevirtamalli

Liikennevirtaa voidaan kuvata sen makroskooppisten muuttujien liikennemäärän, liikennetiheyden ja nopeuden riippuvuuksia tarkastelemalla. Liikennevirtaa kuvataan yksinkertaisimmillaan sen perusyhtälön avulla:

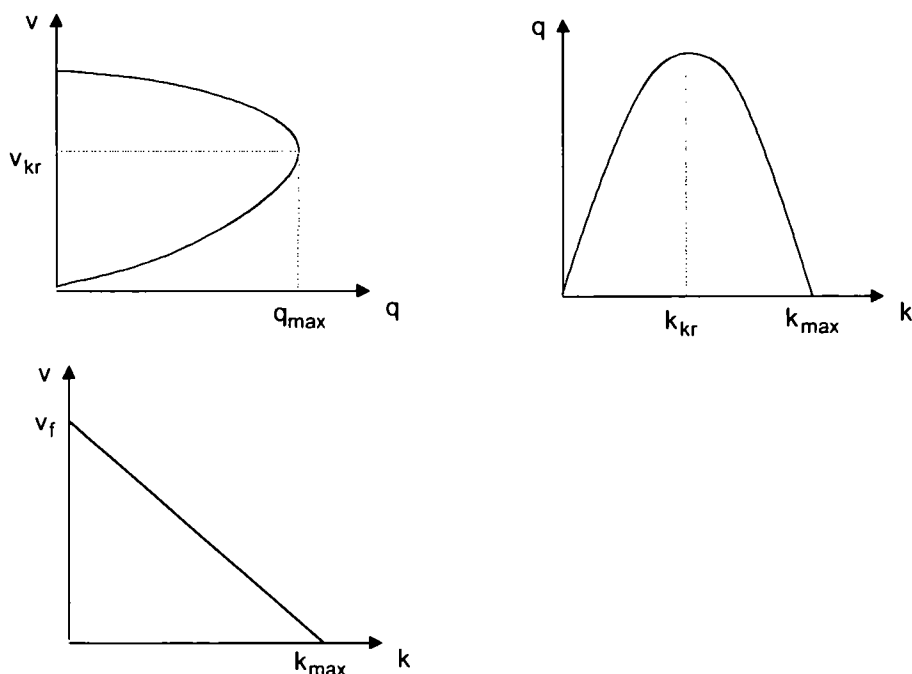
$$q = kv$$

missä q liikennemäärä, ajon/h
 k liikennetiheys, ajon/km
 v nopeus, km/h

Kuvassa 10 on esitetty liikennevirran teoreettiset peruskuvaajat. Liikennetiheyden ollessa lähellä nollaa, nopeus on liikennevirran vapaa nopeus v_f . Liikennetiheyden kasvaessa nopeus laskee yksinkertaisimman teorian mukaan lineaarisesti:

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_{\max}} \right)$$

Nopeus on siis nolla liikennetiheyden saavuttaessa maksimiarvonsa k_{\max} . (May 1990, Pursula, Innamaa 2001.)



Kuva 10. Yksinkertaistetut liikennevirran teoreettiset peruskuvaajat. (Pursula ja Innamaa 2001.)

Liikennemäärän kasvaessa nopeus alenee tiettyyn rajaan v_{kr} (kriittinen nopeus) saakka. Ruuhkautuneissa oloissa nopeus laskee edelleen ja liikennemäärä pienenee. Vastaavasti liikennemäärä kasvaa aluksi liikennetiheyden kasvaessa, kunnes saavutetaan kriittinen liikennetiheys k_{kr} . Liikennetiheyden

edelleen kasvaessa liikennemäärä alkaa laskea. Käytännössä suureiden riippuvuus ei kuitenkaan ole aivan *kuvassa 10* esitetyn kaltainen. Nopeus ei yleensä juurikaan laske liikennemäärän kasvaessa ennen kuin saavutetaan liikennemäärän maksimi. Vasta tämän jälkeen nopeus laskee voimakkaasti. (Pursula ja Innamaa 2001.)

Liikennevirtaa tarkastellaan usein nestevirtausanalogian avulla. Liikennevirran jatkuvuusyhtälö perustuu ajoneuvojen säilymiseen, ts. ajoneuvoja ei voi syntyä tyhjästä eikä niitä voi myöskään kadota. Kun tarkastellaan tiejaksoa, jossa ei ole liittymis- eikä poistumismahdollisuutta, jatkuvuusyhtälö saa muodon

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0$$

Jos tiejaksolla on liittymis- ja poistumispaikkoja, jatkuvuusyhtälö saa yleisemmän muodon

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t)$$

missä $g(x, t)$ on generointiaste, jonka yksikkönä on tiejaksolle saapuvien ja poistuvien ajoneuvojen määrä aika- ja pituusyksikköä kohden. (Pursula ja Innamaa 2001.)

Diskretoitaessa saadaan

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{k(t + \Delta t) - k(t)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q_i(t) - q_{i-1}(t)}{\Delta x}$$

missä i viittaa tiejaksoon (Papageorgiou 2003). Jatkuvuusyhtälöä voidaan tällöin käyttää liikennetiheyden laskentaan. Ajatus perustuu siihen, että peräkkäisten ideaalisten ilmaisinten avulla voidaan mitata niiden välisen tiejakson liikennetiheys, kun ajoneuvomäärää lasketaan ilmaisimilla kumulatiivisesti. Ajoneuvojen määrä tiejaksolla saadaan laskemalla peräkkäisillä mittauspisteillä havaittujen ajoneuvojen lukumäärän erotus. Liikennetiheys puolestaan saadaan jakamalla ajoneuvojen määrä tiejakson pituudella (kaava (1)).

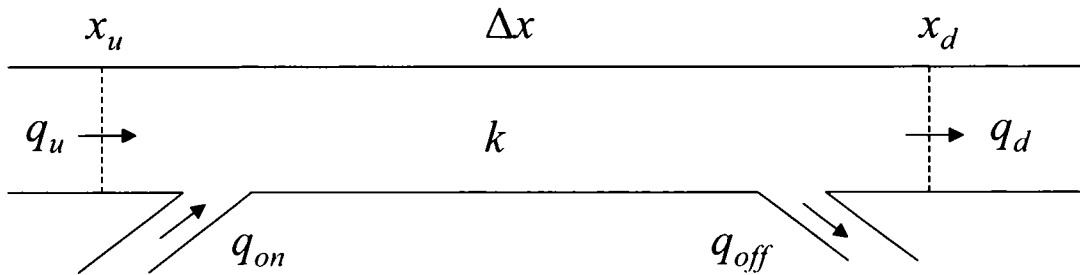
$$k(t) = k(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{l \Delta x} (q_u(t) - q_d(t) + q_{on}(t) - q_{off}(t)) \quad (1)$$

missä	$k(t)$	tiejakson liikennetiheys ajanhetkellä t
	l	kaistojen lukumäärä
	Δx	tiejakson pituus

Δt	laskentajakson pituus
$q_u(t)$	liikennemäärä ylävirran ilmaisimella aikajaksolla $[t, t+\Delta t]$
$q_d(t)$	liikennemäärä alavirran ilmaisimella aikajaksolla $[t, t+\Delta t]$
$q_{on/off}(t)$	liittyvällä/erkanevalla rampilla mitattu liikennemäärä

(Papageorgiou 2003.)

Kuvassa 11 on havainnollistettu tieosan liikennetiheyden laskennassa käytettäviä suureita.



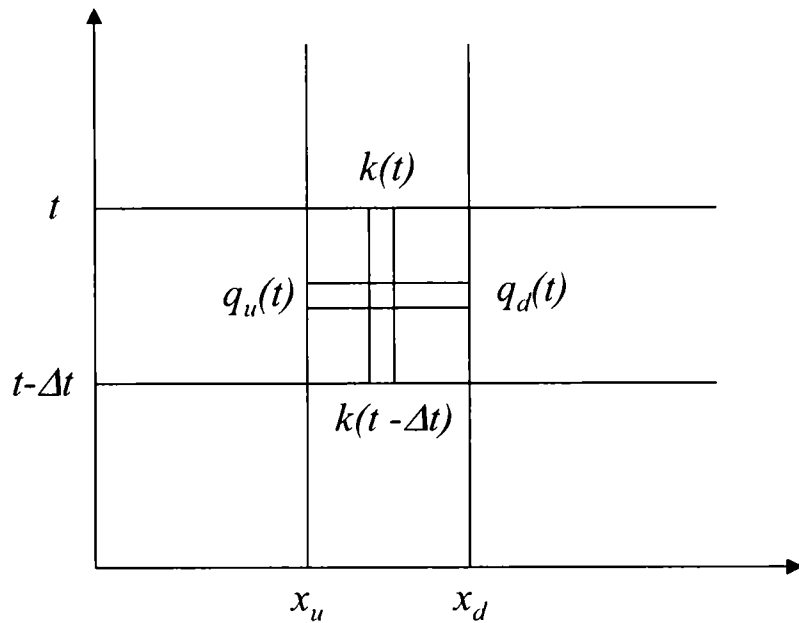
Kuva 11. Tiejakson liikennetiheyden k laskennassa käytettäviä suureita (Oh ym. 2002).

Oh ym. (2002) esittelivät menetelmän, jossa pistemittaustietoja hyödynnetään liikennetiheyden arvioimiseen. Menetelmä perustuu liikennetiheyden laskemiseen jatkuvuusyhtälön avulla. Kun liikennetiheys tietyllä ajanhetkellä tiedetään, voidaan matka-aika arvioida käyttämällä liikennevirran perusyhtälöä. Menetelmän perusajatus on hyvin samankaltainen kuin Westermanin (1995) kuvaama tiejakson alussa ja lopussa mitattuihin liikennemääriin perustuva menetelmä, josta kerrottiin luvussa 3.1.3. (Oh ym. 2002.)

Matka-aika kahden mittauspisteen välillä on funktio liikennetiheydestä ja liikennemäärästä. Oh'n ym. (2002) mukaan estimaatti matka-ajalle saadaan yksinkertaisimmillaan keskiarvona nopeuksista, jotka riippuvat liikennetiheyksistä aikavälin Δt alussa ja lopussa (kaava (2)). Matka-aikaestimaatin laskemisessa käytettyjä liikennemäärä- ja liikennetiheyssuureita on havainnollistettu kuvassa 12. (Oh ym. 2002.)

$$T(t) = \frac{\Delta x}{v} = \frac{\Delta x k}{q} = \frac{\Delta x l(k(t) + k(t - \Delta t))}{q_u(t) + q_{on}(t) + q_d(t) + q_{off}(t)} \quad (2)$$

missä $T(t)$ matka-aika ajanhetkellä t



Kuva 12. Matka-aikaestimaatin laskemisessa käytettävät liikennemäärät ja liikennetiheydet (Oh ym. 2002).

Kun liikennetiheyttä arvioidaan jatkuvuusyhtälön avulla (kaava (1)), tarvitaan liikennetiheydelle lähtöarvo, jonka määrittäminen voi olla vaikeaa. Parasta on, jos liikennetiheyden arviointi voidaan aloittaa sillä hetkellä, kun tiejaksolla ei ole yhtään ajoneuvoa, mutta tällaisen hetken löytäminen voi olla vaikeaa. (Oh ym. 2002.)

Oh ym. (2002) ovat estimoineet liikennetiheyden alkuarvon käyttämällä tietoa ilmaisimen varausasteesta ja ajoneuvojen keskipituudesta. Liikennetiheyden alkuarvo lasketaan seuraavasti

$$k_{occ} = \frac{o}{g + d}$$

missä o varausaste
 g keskimääräinen ajoneuvopituus
 d ilmaisimen pituus

Oh'n ym. (2002) mukaan liikennetiheyden alkuarvoa laskettaessa tiejakson liikenteen tulee olla homogeenista ja ruuhkatonta. Tämän Oh ym. (2002) päättelivät vertaamalla ylä- ja alavirran pistemittauksia toisiinsa. Heidän mukaansa ilmaisimien varausasteiden tulee olla lähellä toisiaan ja pistenopeuden lähellä tieosan vapaata nopeutta:

$$o_u \approx o_d \quad \text{ja} \quad v_u \approx v_d \approx v_f$$

missä o_u ylävirran ilmaisimen varausaste
 o_d alavirran ilmaisimen varausaste
 v_u ylävirran ilmaisimella mitattu pistenopeus
 v_d alavirran ilmaisimella mitattu pistenopeus

v_f tiejakson vapaa nopeus

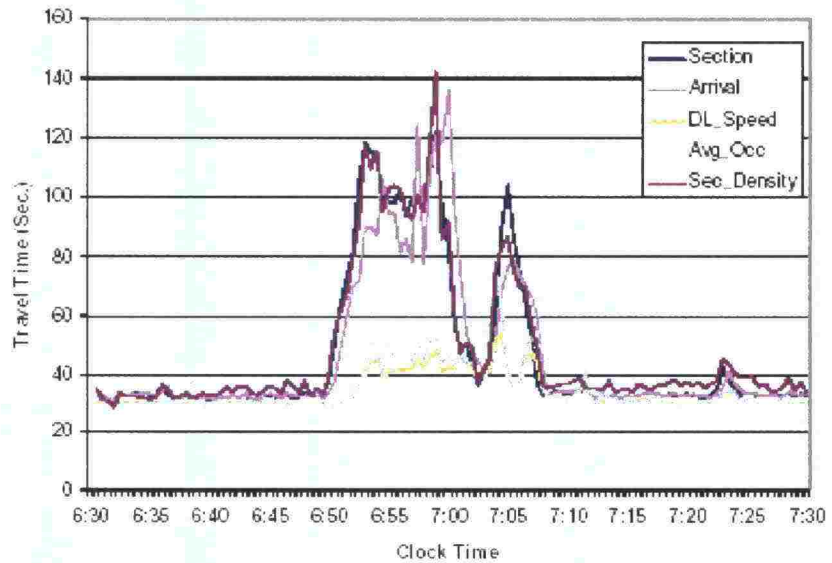
Ilmaisinten mittausvirheet eli puuttuvat havainnot saattavat aiheuttaa liikennetiheyden arvioimiseen systemaattista virhettä, mikäli osa ajoneuvoista jää mittauspisteissä havaitsematta. Koska liikennetiheyden arvioiminen perustuu aina liikennetiheysarvioon edellisellä ajanhetkellä, kumuloituu virhe liikennetiheydestimaattiin ja saattaa kasvaa hyvinkin suureksi. Mittausvirheen takia liikennetiheyden laskenta voidaan joutua aloittamaan alusta hyvin usein, mikä voi etenkin pitkillä tiejaksoilla olla vaikeaa. (Manstetten ja Maichle 1996, Westerman 1995.)

Liikennetiheydestimaattiin kertyvän virheen vaikutusta voidaan yrittää vähentää erilaisilla menetelmillä. Liikennetiheysarvioon kertyvän virheen korjaamista Kalman-suotimen avulla käytetään esimerkkinä luvussa 3.3.8. Manstetten ja Maichle (1996) ovat tutkineet virheen korjaamista sumean logiikan ja neuroverkkojen avulla. Tästä kerrotaan tarkemmin luvussa 3.3.7. Liikennetiheyden estimointia jatkuvuusyhtälön avulla on käytetty tunneleissa USA:ssa. Tällöin käytössä on ollut hyvin tarkat valokennoilmaisimet (May 1990).

Oh ym. (2002) esittävät, että ilmaisuvirheistä johtuvaa systemaattista virhettä voidaan vähentää estimoimalla kalibroitiparametri α , joka ilmentää eroa ylä- ja alavirran mittauspisteiden havaintomäärissä. Kertomalla poistuvien liikennevirtojen liikennemäärä kalibroitiparametrilla saadaan systemaattinen mittausvirhe poistettua.

Oh ym. (2002) ovat tutkineet ehdotettua menetelmää sekä simuloidulla että todellisella liikennemittaustiedolla. Simulointikokeeseen käytettiin Paramics-simulointiohjelmaa. Koealueen käytetyllä tiejaksolla oli yksi poistumisramppi. Tiejakson matka-aika oli ruuhkattomassa tilanteessa noin 35 sekuntia ja kasvoi noin 120 sekuntiin simuloidussa häiriötilanteessa. Ehdotetun menetelmän antamat matka-ajat poikkesivat simulointikokeessa toteutuneista matka-ajoista alle 5 %, kun taas pistenopeuksiin perustuvat matka-aika-arviot olivat noin 25 – 30 % simuloitua matka-aikaa alempia. Ehdotettu menetelmä antoi keskimäärin hieman liian suuria matka-aika-arvioita eli aliarvioi matkanopeuksia. Esimerkki simulointituloksista on esitetty kuvassa 13.

Maastossa mitattua liikennetietoa käytettäessä todellisia matka-aikoja ei tiedetty. Ehdotetun menetelmän matka-aikaestimaatteja verrattiin kuitenkin pistenopeuksiin perustuviin matka-aikalaskelmiin. Havaittiin, että pistenopeuksiin perustuvat matka-aika-arviot olivat noin 65 % ehdotetun liikennetiheyden arviointia hyödyntävän menetelmän antamista matka-aikaestimaateista. (Oh ym. 2002.)



Kuva 13. Simulointikokeessa saadut matka-aikatulokset. Section = todellinen matka-aika, Arrival = aikavälin aikana perille saapuneiden matka-aika, DL_Speed = kahden pistenopeuden keskiarvo, Avg_Occ = keskimääräinen varausaste, Sec_Density = liikennevirtamalli. (Oh ym. 2002.)

3.3 Datafuusiomenetelmät

3.3.1 Bayesilainen ja Dempster-Shafer -päätely

Bayesilainen päätely on ehdolliseen todennäköisyyteen perustuva tilastollinen datafuusiomenetelmä. Bayesilaisessa päätelyssä päivitetään eri tapahtumien todennäköisyyksiä havaintoihin perustuen. Kullekin tapahtumalle tarvitaan siis a priori -todennäköisyys, jonka jälkeen lasketaan havaintoihin perustuva ehdollinen eli a posteriori todennäköisyys. Tarvittavan a priori -todennäköisyyden määrittäminen voi kuitenkin olla vaikeaa. Bayesilaisessa päätelyssä oletetaan, että alkeistapahtumat ovat toisensa poissulkevia ja täyttävät koko todennäköisyysvarauuden. (Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Ehdollisen todennäköisyyden määritelmän mukaan tapahtuman E todennäköisyys, kun oletetaan, että tapahtuma H on toteutunut, on:

$$P(E | H) = \frac{P(EH)}{P(H)} \quad (3)$$

missä $P(EH)$ on todennäköisyys, että tapahtumien E ja H leikkaus toteutuu (eli molemmat tapahtumat toteutuvat). Kaava (3) voidaan kirjoittaa uudelleen muotoon

$$P(EH) = P(E | H)P(H) \quad (4)$$

Kun tapahtuma H koostuu toisensa poissulkevista ja koko todennäköisyysvaruuden käsittävistä alkeistapahtumista, tapahtuma E voi esiintyä ainoastaan jonkin tapahtuman H_j kanssa:

$$E = EH_1 \cup EH_2 \cup \dots \cup EH_n \quad (5)$$

Koska tapahtumat EH_j ovat toisensa poissulkevia, saadaan tapahtuman E todennäköisyys summana

$$P(E) = \sum_{j=1}^n P(EH_j) \quad (6)$$

Sijoittamalla H_j H :n tilalle ja summaamalla saadaan kaavasta (4):

$$P(E) = \sum_j [P(E | H_j)P(H_j)] \quad (7)$$

Bayesilainen päättely kertoo todennäköisyyden, että H_i on tosi, mikäli tapahtuma E on tapahtunut:

$$P(H_i | E) = \frac{P(EH_i)}{P(E)} \quad (8)$$

Sijoittamalla (4) ja (7) yhtälöön (8) saadaan Bayesin kaava

$$P(H_i | E) = \frac{P(E | H_i)P(H_i)}{\sum_j [P(E | H_j)P(H_j)]} \quad (9)$$

Kaavalla (9) voidaan siis laskea esimerkiksi millä todennäköisyydellä liikennetilanne on ruuhkainen (H_i), kun tiedetään esimerkiksi pistenopeuden jossain poikkileikkauksessa olevan 75 % vapaasta nopeudesta (E). Tällöin oletetaan, että tiedossa on a priori -todennäköisyys jokaiselle liikennetilanteelle $P(H_j)$ sekä ehdollinen todennäköisyys $P(E|H_i)$, jolla pistenopeus kyseisessä poikkileikkauksessa on 75 % vapaasta nopeudesta kussakin liikennetilanteessa. (Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Dempster-Shafer -päättely on toinen tilastollinen datafuusiomenetelmä. Dempster-Shafer -päättely yleistää bayesilaisen päättelyn tapauksiin, joissa todennäköisyysmassa on jaettu osajoukoille (alkeistapahtumien unioneille) ilman, että sitä jaettaisiin alkeistapahtumien kesken. Evidenssi, jonka ei katsota tukevan mitään osajoukkoa tai sen negaatiota, annetaan kaikkien alkeistapahtumien unionille Θ , joka edustaa epävarmuutta. Näin voidaan esittää esimerkiksi mittauksen luotettavuus. Dempster-Shafer -teoriassa on luo-

vuttu vaatimuksesta, että osajoukot olisivat toisensa poissulkevia ja täyttäisivät koko todennäköisyysvaruuden. (Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Jokainen ilmainen tai muu tiedonlähde k liittyy jokaiseen osatapahtumaan o_i todennäköisyysmassan $m_k(o_i)$ väliltä $[0,1]$. Esimerkiksi osatapahtuma, että ilmaisimella s havaittu tapahtuma on tyyppiä a_1 tai a_2 saa havaintojen perusteella todennäköisyysmassan $m_s(a_1 \cup a_2)$. Eri havaintopisteiden tuottamat todennäköisyysmassat eri tapahtumille yhdistetään Dempsterin säännöllä. Eniten todennäköisyysmassaa saanut tapahtuma on yhdistämisprosessin antama ulostulo. Ajantasaisen mittaustiedon lisäksi yhdistämisessä voidaan käyttää muutakin tietokantaan talletettua tietoa tai sääntöjä. (Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Dempster-Shafer -menetelmä yhdistää kaksi todennäköisyysmassafunktiota (esim. eri tietolähteistä saadut) m_1 ja m_2 yhdeksi massafunktioksi $m_1 \oplus m_2$. Olkoon D ja E kaksi osajoukkoa, joiden todennäköisyysmassafunktioiden arvot ovat $m_1(D)$ ja $m_2(E)$. Yhdistetty todennäköisyysmassafunktio osajoukkojen D ja E leikkaukselle $C = D \cap E$ saa arvon $m_1(D)m_2(E)$. Yhdistetyn todennäköisyysmassafunktion arvo lasketaan Dempsterin kaavalla:

$$(m_1 \oplus m_2) = \frac{\sum_{D_i \cap E_j = C} m_1(D_i) m_2(E_j)}{1 - \sum_{D_i \cap E_j = \emptyset} m_1(D_i) m_2(E_j)}$$

Yleensä katsotaan, että yhdistämisprosessissa suurimman todennäköisyysmassan saanut alkeistapahtuma tai osajoukko on Dempster-Shafer -päättelyn antama tulos. (Klein 2001, Korpisaari 2001.)

Todennäköisyysmassaa voidaan käyttää tapahtuman epävarmuusintervallin määrittämiseen. Tällöin tarkastellaan, kuinka todennäköinen on jokin tapahtuma ja kuinka todennäköinen on sen negaatio. Uskomus (support) on summa evidensseistä, jotka tukevat kyseistä tapahtumaa. Ylätodennäköisyys (plausibility) on summa evidensseistä, jotka eivät tue tapahtuman negaatiota. Uskomuksen ja ylätodennäköisyyden ero riippuu havaintotietojen epävarmuudesta. Mikäli epävarmuutta ei ole, uskomus ja ylätodennäköisyys ovat yhtä suuria ja Dempster-Shafer -teoria antaa saman tuloksen kuin bayesilainen päättely. Epävarmuuden kasvaessa uskomus ja ylätodennäköisyys pienenevät ja niiden ero kasvaa. Lopulta epävarmuustason ollessa 1, kyseiset tiedot eivät vaikuta todennäköisyyden laskentaan. (Choi ym. 1998, Klein 2001, Korpisaari 2001.)

3.3.2 Dempster-Shafer -päättelyn käyttö ruuhkautuneisuuden määrittämisessä

Tämä luku perustuu lähteeseen Choi ym. (1998).

Choi ym. (1998) esittivät Dempster-Shafer -päättelyyn perustuvan menetelmän, jolla analysoitiin ruuhkautumisen astetta erilaisten lähtötietojen avulla. Tarkoituksena oli estimoida liikennetilanne tiejaksolle, jolla ei ole mittauspis-

teitä. Mittauspisteet sijaitsivat kuitenkin lähellä kiinnostuksen kohteena olevaa tiejaksoa. Mittauspisteiden tietojen lisäksi käytettiin tietoa säästä ja tilastotietoa liikenteestä sekä tarkastellulla tiejaksolla että sen viereisillä tiejaksoilla. Menetelmässä haluttiin selvittää, millä todennäköisyydellä liikennetilanne tarkastellulla tiejaksolla oli sama kuin sen viereisillä tiejaksoilla, joista mittaustietoa oli saatavilla. Choin ym. (1998) ehdottama menetelmä on kaksisiosainen. Modifiointisääntö kertoo, miten viereisten tiejaksojen mittaustieto muunnetaan lisäinformaation avulla halutun tiejakson tiedoksi. Toinen vaihe on eri lähteistä saadun tiedon yhdistäminen. Tähän käytettiin Dempster-Shafer -menetelmää.

Choin ym. (1998) menetelmässä historiatieto on jaettu kolmeen pääluokkaan (arkipäivät, viikonloppu, loma-ajat) ja 12 alaluokkaan (jokainen pääluokka on jaettu kahden tunnin jaksoihin). Näin saadaan 36 eri luokkaa. Halutun tiejakson liikennetilanteen ja sen viereisten tiejaksojen liikennetilanteiden yhteyttä tarkasteltiin luokittain.

Viereisten tiejaksojen mittaustietojen ja lisäinformaation muokkauksen tuloksena saatiin halutun tiejakson liikennetilanne ja sen luotettavuustaso määritettynä kullekin tietolähteelle erikseen. Seuraavaksi menetelmässä yhdistettiin eri tietolähteistä erikseen saadut liikennetilanteen estimaatit käyttämällä Dempster-Shafer -menetelmää. Tämä tehtiin, jotta liikennetilanteesta saataisiin luotettavampi kuva. Dempster-Shafer -päätely sopii käytettäväksi bayesilaista päätelyä paremmin, koska sen avulla voidaan ottaa huomioon tiedon luotettavuustaso.

Choi ym. (1998) ovat testanneet menetelmää simuloimalla. Tarkasteltavalla tiejaksolla ei ollut ilmaisimia, mutta sen viereisiltä tiejaksoilta oli saatavilla kolmea erilaista tietoa (ilmaisinsilmukat, kamerat ja manuaaliset raportit). Jokainen tietolähde tuotti estimaatin liikennetilanteesta (ruuhkan tasosta) ja arvioon estimaatin luotettavuudesta. Liikennetilanne luokiteltiin tiejakson matkanopeuden perusteella seitsemään eri luokkaan. Tilastotiedon perusteella oli määritelty kertoimet, joilla kunkin mittauspisteen tilanteen oli huomattu korreloivan tarkasteltavan tiejakson liikennetilanteen kanssa. Lisäksi säätietoja käytettiin määrittämään kameroista saatavan tiedon luotettavuutta. Sään ollessa huono kameroista saatava tieto ei ole yhtä luotettavaa kuin kirkkaalla säällä.

Kertoimien perusteella sovellettiin modifiointisääntöä. Näin saatiin eri liikennetilanteiden todennäköisyys tarkastellulla tiejaksolla kunkin yksittäisen tietolähteen tietojen perusteella. Lopuksi mittauspisteiden tiedot yhdistettiin Dempsterin sääntöä käyttäen. Tästä saatiin todennäköisyys kullekin liikennetilanteelle (tai liikennetilanteiden yhdistelmälle) sekä epävarmuudelle. Yhdistämisen myötä epävarmuuden saama todennäköisyysmassa pieneni. Tietyn liikennetilanteen epävarmuusintervalli saadaan havaintojen tuottaman uskomuksen ja ylätodennäköisyyden avulla. Tietyn liikennetilanteen todennäköisyyden uskomus on Dempsterin säännön suoraan kyseiselle liikennetilanteelle antama todennäköisyysmassa. Tietyn liikennetilanteen ylätodennäköisyys puolestaan saadaan vähentämällä ykkösestä muiden kuin kiinnostuksen kohteena olevan liikennetilanteen saama todennäköisyysmassa.

Dempster-Shafer -päätelyn käyttö on varsin suoraviivaista ja vähentää onnistuessaan liikennetilannearvion epävarmuutta. Menetelmän käyttö kuitenkin vaatii, että eri tietolähteiden antama evidenssi eri liikennetilanteille tai nii-

den yhdistelmille on mahdollista määrittää tarpeeksi luotettavasti. Tähän tarvitaan tilastotietoa mittauspisteiden antamista tiedoista erilaisissa liikennetilanteissa.

3.3.3 Sumea logiikka

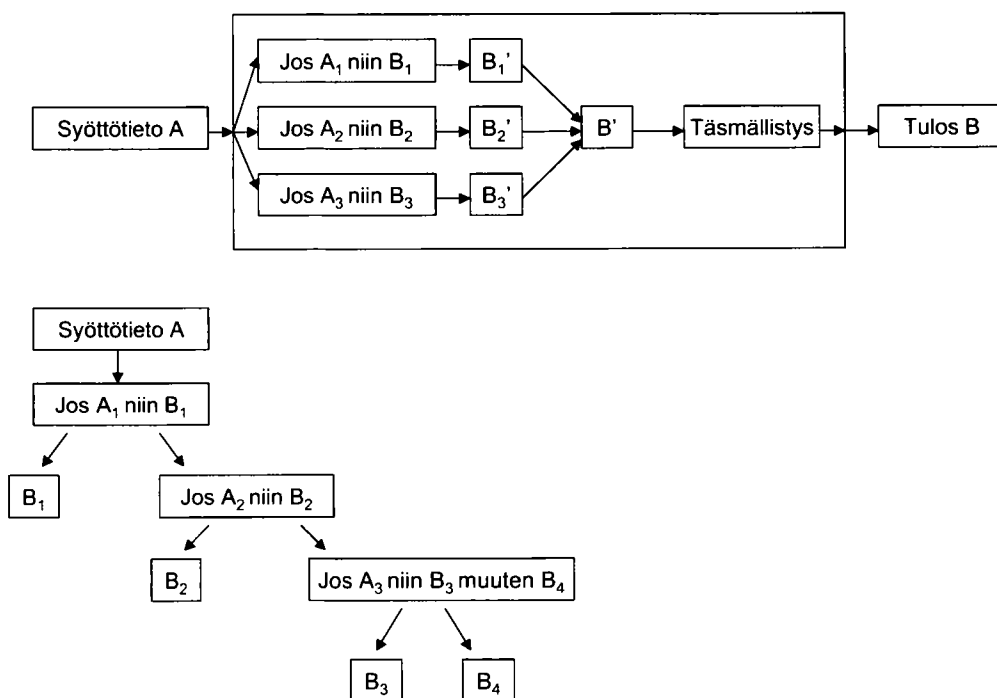
Amerikkalainen L. A. Zadeh esitteli 1960-luvulla teorian sumeasta logiikasta, jonka pyrkimyksenä on ihmisen ajattelun mallintaminen. Sumean logiikan mukaan tilanteet eivät ole mustavalkoisia joko tai -tilanteita. Jokin asia voi olla osittain tosi tai alkio voi kuulua tiettyyn joukkoon osittain tai useampaan joukkoon yhtäaikaan. Sumea logiikka pyrkii esittämään epävarmuutta ja epämääräisyyttä, joka liittyy moniin reaali maailman ongelmiin. Sumea logiikka sopii tilanteisiin, joissa

- yksi tai useampi muuttuja on jatkuva,
- joukkojen rajat eivät ole täsmällisiä tai lähtötiedot ovat osin puutteellisia,
- ongelman matemaattinen kuvaaminen on vaikeaa,
- ongelmaa kuvaavat säännöt ja sumeat joukot on helppo määritellä eli järjestelmästä ja muuttujien riippuvuussuhteista on olemassa asiantuntijatietämystä.

(Klein 2001, Pursula 1995.)

Sumea joukko (fuzzy set) tarkoittaa joukkoa, jonka alkiot voivat kuulua joukkoon myös vain osittain. Alkion joukkoon kuulumisen asteen ilmoittaa jäsenyysfunktio (membership function). Jäsenyysfunktio voi saada arvoja väliltä $[0, 1]$. Jäsenyysfunktion arvolla 0 alkio ei kuulu joukkoon ja jäsenyysfunktion arvolla 1 se kuuluu joukkoon kokonaan. Muilla jäsenyysfunktion arvoilla alkio kuuluu joukkoon osittain. Joukon ja sen ulkopuolisen avaruuden raja ei siis ole täsmällinen. (Pursula 1995.)

Järjestelmää, jonka toimintaan liittyy sumeutta, kutsutaan sumeaksi järjestelmäksi (fuzzy system). Sumean järjestelmän kuvaus esitetään joukkona lingvistisiä (kielellisiä) sääntöjä, joista jokaisen voimassaolon aste arvioidaan samanaikaisesti sumean päättelyn avulla. Johtopäätös on kompromissi kaikista asiaan liittyvistä säännöistä. Tässä sumea päättely eroaa perinteisestä kaksiarvoiseen logiikkaan perustuvasta sääntöjärjestelmästä, joka haarautuu toisensa poissulkevien vaihtoehtojen ketjuiksi, ja jossa sääntöjen voimassaolo arvioidaan peräkkäin. Sumeaa ja kaksiarvoista päättelyä on havainnollistettu *kuvassa 14*. (Pursula 1995.)

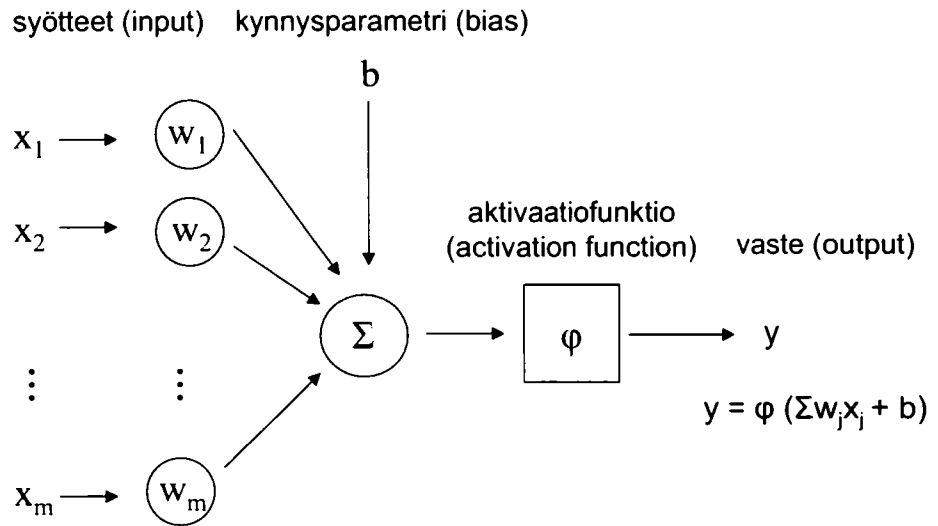


Kuva 14. Sumeaan logiikkaan perustuva päättelyketju (yllä) ja kaksiarvoiseen logiikkaan perustuva päättelyketju (alla) (Pursula 1995).

Sumean järjestelmän rakentaminen eroaa perinteisestä systeemin mallintamisesta siinä, että matemaattisen mallin sijaan käytetään sanallista sääntömuotoista kuvausta. Systeemin toimintaan liittyvät syy-seuraussuhteet esitetään sääntöinä, joihin liittyvät ehdot ja riippuvaisuudet ovat luonteeltaan sumeita. Sumean päättelyn tulos on yleensä sumea, joten tuloksen saattaminen yksikäsitteiseen muotoon vaatii täsmällistämistä. Sumea järjestelmä antaa jäsenyysastefunktion, josta täsmällistäminen voidaan tehdä esimerkiksi laskemalla jäsenyysastefunktion rajaaman alueen painopisteen sijainti tai käyttämällä jäsenyysfunktion maksimia. (Pursula 1995).

3.3.4 Neuroverkot

Neuroverkkojen ideana on jäljitellä ihmisen oppimis- ja päättelyprosessia matemaattisesti. Neuroverkoilla jäljitellään biologisia hermosoluja ja näiden välisiä yhteyksiä. Neuroverkko koostuu joukosta keinotekoisia hermosoluja eli neuroneja, jotka on liitetty toisiinsa. Neuron on neuroverkon laskennallinen perusyksikkö, joka kokoaa syötearvot, laskee niiden perusteella vasteen ja lähettää vasteen verkossa eteenpäin. Neuronin rakenne on esitetty kuvassa 15. (Hintikka ja Göös 2003, Koikkalainen ja Oja 1994.)



Kuva 15. Neuronin rakenne (Haykin 1999).

Tietojen käsittely tapahtuu neuronit toisiinsa yhdistävien liitosten välityksellä. Neuroverkolle opetetaan asioita syöttämällä sille esimerkkejä analysoitavista tilanteista. Neuroverkot oppivat esimerkeistä yleistämällä eivätkä ne tarvitse minkäänlaista asiantuntemusta kohteesta. Opetusprosessia varten tarkasteltavasta järjestelmästä tarvitaan hyvin paljon laadukasta mittaustietoa, mikä saattaa sovelluksissa muodostua rajoittavaksi tekijäksi. Opetusdataa on oltava riittävästi estimoitavien parametrien lukumäärään nähden, ettei ylioppimista tapahdu, sillä neuroverkon tulee osata yleistää muuttujien väliset riippuvuudet. (Hintikka ja Göös 2003, Innamaa 1999.)

Neuroverkoille on tyypillistä niiden kyky yleistää, niiden itsensä luomat säännöt, virheensietokyky ja ympäristön muutosten sietokyky. Toiminnassaan neuroverkot ovat osoittautuneet varsin kyvykkäiksi: ne pystyvät löytämään kompleksisia vuorovaikutuksia laajasta lähtöaineistosta. Neuroverkkojen käyttö sopii järjestelmiin, joissa on paljon muuttujia, joiden välillä on monimutkaisia epälineaarisia riippuvaisuuksia. Neuroverkot sopivat mallintamaan ns. black box -järjestelmiä eli järjestelmiä, joiden syötteet ja vasteet tunnetaan, mutta ei sitä, mitä järjestelmässä tapahtuu ja millaisia riippuvaisuuksia se sisältää. Suuret neuroverkkosovellukset sisältävät kohtuullisen paljon vaativaa laskentaa, mikä vaatii paljon tietokoneen suoritusnopeutta. (Hintikka ja Göös 2003, Klein 2001.)

Neuroverkon opetus jaetaan ohjattuun (supervised) ja ohjaamattomaan (unsupervised) opetukseen. Ohjatussa opetuksessa haluttu lopputulos on tiedossa ja opetus perustuu siihen, kuinka paljon verkon vaste poikkeaa halutusta vasteesta. Opetusalgoritmi pyrkii minimoimaan saadun vasteen ja halutun vasteen välisen eron. Tällä tavalla opetettu verkko voi esimerkiksi tunnistaa ennalta määrättyjä ryhmiä tutkittavasta datasta tai ennustaa prosessin käyttäytymistä. Ohjaamattomassa opetuksessa tavoitteita ei tietoisesti aseteta. Tätä käytetään erilaisissa ryhmittelyissä, kun etukäteen ei tiedetä millaisia ryhmiä tai luokkia lähtötiedosta löytyy. Esimerkkinä tästä on itseorganisoiuva kartta eli SOM (Self Organising Map) -neuroverkko. Neuroverkon oppiminen tapahtuu solmujen välillä sijaisevien liitosten voimakkuuksissa tapahtuvina muutoksina. (Hintikka ja Göös 2003.)

Neuroverkkoja voidaan käyttää myös yhdessä sumean logiikan kanssa. Tästä on hyötyä erityisesti tilanteissa, joissa tutkittavan järjestelmän muuttujien riippuvaisuuksista ei ole tarpeeksi tietoa tai järjestelmällä on niin monta mahdollista tilaa, että sumeiden sääntöjen ja joukkojen muotoileminen pelkästään ihmisen asiantuntemuksen pohjalta on työlästä. Neuroverkkoja voidaan käyttää apuna sumeiden sääntöjen ja sumeiden joukkojen muotoiluun. Sumeaa logiikkaa voidaan käyttää neuroverkkojen yhteydessä myös su-meuttamalla neuroverkon käyttämä opetusdata. Tällöin neuroverkon antama ulostulo täytyy myös täsmällistää. Sumean opetusdatan avulla neuroverkko oppii datan riippuvuudet nopeammin. (Klein 2001, Palacharla ja Nelson 1999.)

3.3.5 Matka-ajan estimoiminen neuroverkkojen avulla

Tämä luku perustuu lähteeseen Innamaa ym. (2002).

Innamaa ym. (2002) ovat tutkineet neuroverkkojen käyttöä matka-ajan estimoimisessa tiejaksoille, jonka matka-aikaa ei mitata. Lähtötietoina käytettiin kyseisen tiejakson viereisten tiejaksojen matka-aikaa sekä LAM-pistetietoja. Matka-aikoja estimoitiin Kehä I:llä tiejaksoille Otaniemi–Konala ja Konala–Pukinmäki molempiin suuntiin (yhteensä neljä tiejaksoa). Tiejaksojen pituudet olivat 8,6 km ja 7,4 km. Tutkimuksessa selvitettiin myös neuroverkkojen käyttöä lyhyen ajan matka-aikaennusteiden tekemisessä.

Neuroverkoilla käytetyt syötesuureet valittiin tarkastelemalla eri muuttujien korrelaatiota kyseisen tiejakson matka-ajan kanssa. Estimoitavan tiejakson keskimatka-ajan korrelaatiota tutkittiin saman suunnan tiejaksojen keskimatka-aikojen, matka-aikojen keskihajontojen ja matka-aikojen mediaanien sekä LAM-pisteissä mitattujen liikennemäärien, pistenopeuksien ja pistenopeuksien keskihajonnan kanssa. Syötteiksi valittiin muuttujat, joiden korrelaatio estimoitavan matka-ajan kanssa oli vähintään 0,20 ja muiden syötteiden kanssa korkeintaan 0,95. Kullekin tiejaksolle valitut syötetiedot on esitetty *taulukossa 4*. Huomattavaa on, että matka-ajan korrelaatio LAM-pisteissä mitattujen pistenopeuksien ja pistenopeuden keskihajonnan kanssa oli niin pieni, että vain yhdelle tiejaksolle valittiin syötesuureeksi LAM-pisteellä mitattu keskinopeus.

LIIKENNETILANTEEN ARVIOINTIIN SOVELTUVAT MENETELMÄT

Taulukko 4. Eri tiejaksojen ennuste- ja estimaattimalleille valitut syötesuureet (estimaateissa oman tiejakson matka-aikasuureita ei käytetä). 20 v. tarkoittaa 20 viimeistä havaintoa. Aikasarjan pituutena käytettiin kolme kertaa viittä minuuttia. Ot = Otaniemi, Ko = Konala, Pu = Pukinmäki. (Innmaa ym. 2002.)

Lähtötieto			Ennuste-/estimaattilinkki			
			Ot-Ko	Ko-Pu	Pu-Ko	Ko-Ot
Matka- aika itään	Ot-Ko	Keskiarvo	aikasarja	aikasarja	-	-
		Keskihajonta	20 v.	20 v.	-	-
	Ot-Pu	Keskiarvo	aikasarja	aikasarja	-	-
		Keskihajonta	-	20 v.	-	-
Matka- aika länteen	Pu-Ko	Keskiarvo	-	-	aikasarja	aikasarja
		Keskihajonta	-	-	20 v.	20 v.
	Ko-Ot	Keskiarvo	-	-	aikasarja	aikasarja
		Keskihajonta	-	-	-	20 v.
Konalan LAM-piste		Liikennemäärä	aikasarja	-	aikasarja	aikasarja
		Keskinopeus	-	-	-	aikasarja
Pukinmäen LAM-piste		Liikennemäärä	aikasarja	-	aikasarja	aikasarja

Kehä I:lle tehdyissä estimaattimalleissa pyrittiin siis estimoimaan tietyn tiejakson matka-aika viereisten tiejaksojen matka-aikojen ja LAM-pistetietojen perusteella. Ennustemalleissa puolestaan pyrittiin ennustamaan tietylle tiejaksolle lähtevien ajoneuvojen keskimatka-aika viimeisten mitattujen suureiden perusteella. Ennustemalleissa olivat käytettävissä myös tarkasteltavan tiejakson omat viimeksi mitatut matka-ajat.

Ennustemallit antoivat tilastollisesti tarkastellen parempia tuloksia kuin estimaattimallit. Keskimääräinen suhteellisen virheen itseisarvo oli estimaattimalleilla Otaniemen ja Konalan välillä noin 10 % ja Konalan ja Pukinmäen välillä noin 6 %. Kun tuloksia tarkasteltiin oikein estimoitujen matka-aikojen osuutena, neuroverkkoihin perustuvat estimointimallit pärjäsivät kohtalaisesti. Oikein estimoitujen matka-aikojen osuus oli noin 90 %. Ruuhkatilanteissa tilanne oli kuitenkin oleellisesti heikompi. Korkeintaan noin kolmasosa estimaateista osui oikeaan. Osassa tilanteista estimointimalli ei havainnut ruuhkaa lainkaan, vaikka tiejakson matka-aika oli selvästi kohonnut. Tähän oli syynä se, että toisinaan ruuhka oli paikallinen eikä näkynyt sen LAM-pisteen mittaustiedoissa tai viereisen tiejakson matka-ajassa, joiden perusteella tarkasteltava matka-aika estimoitiin. Estimaattimallien tuloksia on esitelty taulukossa 5.

Taulukko 5. Eri estimaattimallien hyvyys mitattuna oikein arvioitujen (o%), liian pieniksi arvioitujen (p%) ja liian suureksi arvioitujen (s%) matka-aikojen osuutena ajasta koko aineistossa ja ruuhka-aineistossa. Ot = Otaniemi, Ko = Konala, Pu = Pukinmäki. (Innmaa ym. 2002.)

		Ot-Ko	Ko-Pu	Pu-Ko	Ko-Ot
Kaikki	o %	88,0	94,7	91,7	90,0
	s %	5,6	2,1	4,5	3,6
	p %	6,4	3,3	3,8	6,4
Ruuhka	o %	30,5	34,3	25,8	30,1
	s %	14,3	3,0	9,4	6,4
	p %	55,3	62,7	64,8	63,5

Tutkimuksessa kehitettiin matka-ajan ennustemallit myös valtatielle 4 välille Lahti–Heinola. Nämä mallit onnistuivat matka-ajan ennustamisessa Kehä I:n malleja paremmin. Vaikka matka-ajan mittauspisteet ovat molemmissa kohteissa lähes yhtä kaukana toisistaan, oli ero mallien hyvydessä huomattava. Tutkimuksessa huomattiin, että Kehä I:llä korrelaatio estimoitavan tai ennustettavan matka-ajan ja muiden lähtötietojen välillä oli selvästi heikompaa kuin Valtatie 4:llä. Kehä I:llä on paljon liikennevaloja, jotka sekoittavat liikennevirtaa. Matka-ajan estimointi tietylle tiejaksolle muiden tiejaksojen matka-aikojen ja LAM-pistetietojen perusteella ei tuottanut toivottavia tuloksia. Tiejakso tämän tyyppiseen matka-ajan estimointiin olivat liian pitkiä eikä tiejakson päätepisteissä sijaitsevien LAM-pisteiden liikennetietojen voida ajatella edustavan koko tiejakson liikennetilannetta.

3.3.6 Matka-ajan arviointi liikennevaloympäristössä neuroverkkojen ja sumean logiikan avulla

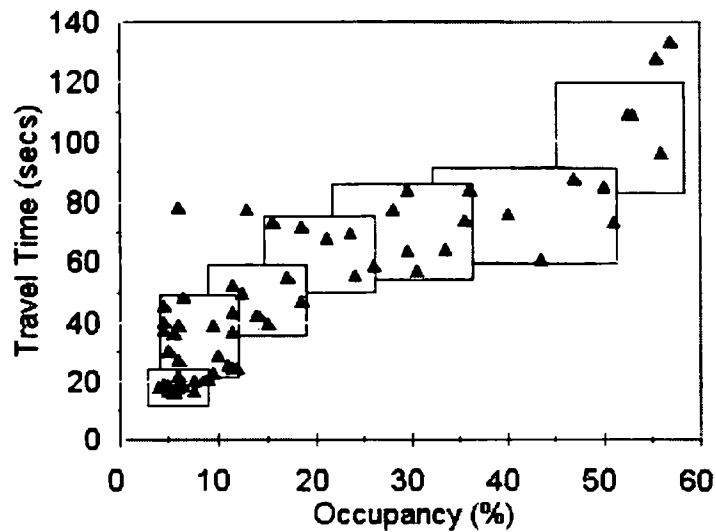
Tämä luku perustuu lähteeseen Palacharla ja Nelson (1999).

Palacharla ja Nelson (1999) ovat tutkineet menetelmää, jossa sumeaa loogikkaa käytetään matka-ajan arviointiin. Lähtötietona he käyttivät liikennevalojen ilmaisimilta saatua liikennemäärä- ja varausastetietoa. Tavoitteena oli estimoida myös häiriintyneen liikennevirran matka-aika oikein. Palacharla ja Nelson (1999) käyttivät sumeiden sääntöjen muotoilemiseen sekä asiantuntijan tuntemusta että neuroverkkoja.

Palacharla ja Nelson (1999) aloittivat sumean sääntökannan kehittämisen analysoimalla Chicagossa mitattua liikennemäärä- ja varausastetietoa, jota saatiin liikennevalojen ilmaisimilta. Todelliset matka-ajat mitattiin samaan aikaan anturiajoneuvojen avulla. Lähtötietoa analysoimalla huomattiin, että ilmaisimen varausasteen ja matka-ajan välinen riippuvuus oli epälineaarinen. Varausasteelle ja matka-ajalle määritettiin kummallekin seitsemän sumeaa joukkoa. Matka-aika- ja varausastemittaukset ja niille määritetyt sumeat joukot on esitetty graafisesti kuvassa 16. Sumeat säännöt muotoiltiin seuraavaan tapaan:

Jos varausaste on alle keskiarvon, matka-aika on alle keskiarvon.

Liikennemäärän ja matka-ajan riippuvuudelle määritettiin vastaavat sumeat säännöt. Päätelyssä hyödynnettiin siis varausaste- ja liikennemäärätietoja erikseen.



Kuva 16. Matka-aika – varausastemittaukset sekä niille muotoillut sumeat joukot (Palacharla ja Nelson 1999).

Sumean logiikan lisäksi Palacharla ja Nelson (1999) tarkastelivat matka-ajan estimointia käyttämällä sumeaa logiikkaa neuroverkkojen apuna. Opetusdataa esitettiin neuroverkolle sumeassa muodossa. Syöteinä käytettiin liikennemäärää ja ilmaisimen varausastetta ja vasteena matka-ajan sijasta viivytystä. Jokaiselle muuttujalle määritettiin sumeat joukot ja jokaiselle opetusdatan pisteelle jäsenyysaste kussakin sumeassa joukossa. Nämä tiedot syötettiin neuroverkolle opetusprosessissa. Opetuksen jälkeen neuroverkko tuotti jokaiselle saamalleen sumealle liikennemäärä- ja varausastetiedolle sumean viivytysarvion. Sumea viivytys täsmällistettiin käyttämällä yksinkertaista painotettua summaa.

Menetelmiä testatessaan Palacharla ja Nelson (1999) huomasivat, että ilmaisimen varausaste on liikennemäärää parempi indikaattori matka-ajalle. Sumeaa logiikkaa käyttävä menetelmä osoittautui matka-aikojen estimoinnissa paremmaksi kuin lineaarista regressiota käyttävä vertailumalli. Estimaatit olivat lähempänä todellisuutta mallin kompleksisuuden merkittävästi kasvamatta. Neuroverkkojen käyttö paransi estimointitulosta pelkkään sumean logiikan käyttöön verrattuna.

3.3.7 Liikennetiheysestimaatin korjaaminen sumean logiikan ja neuroverkkojen avulla

Tämä luku perustuu lähteeseen Manstetten ja Maichle (1996).

Luvussa 3.2 kerrottiin liikennetiheyden estimoinnista liikennevirran jatkuvuusyhtälön avulla. Menetelmän todettiin olevan herkkä ilmaisinvirheille. Havaitsematta jäävät ajoneuvot aiheuttavat liikennetiheysestimaattiin kumulatiivisen virheen. Estimaattiin aiheutuu virhettä myös silloin, kun liikennetiheyden alkuarvo on arvioitua väärin. Manstetten ja Maichle (1996) ovat kuvanneet sumean logiikan hyödyntämistä liikennetiheysestimaatin virheen kor-

jaamisessa. He pyrkivät mallintamaan virheen suuruutta mittaustietojen ja sumeiden sääntöjen avulla.

Sumean logiikan avulla korjattu liikennetiheys sai kaavan

$$k_{uusi} = k_{est} + virhe$$

missä	k_{uusi}	korjattu liikennetiheystestimaatti
	k_{est}	estimoitu liikennetiheys
	$virhe$	estimoidun liikennetiheyden oletettu poikkeama todellisesta liikennetiheydestä

Liikennetiheystestimaattia korjattiin useista mittauspisteistä saadun pistetiedon avulla. Tarvittava korjaus pääteltiin sumeiden sääntöjen avulla. Koska kattavan sumean sääntökannan muodostaminen etenkin epävakaassa liikennetilanteessa on vaikeaa, sääntöjen luomisessa käytettiin apuna neuroverkkoja. Neuroverkkojen avulla määritettiin myös muuttujien sumeat joukot.

Sumeat säännöt kehitettiin simuloidun liikennetiedon avulla. Maastossa mitattua liikennetietoa ei käytetty kahdesta syystä. Jotta liikennetiheystimaatin korjaaminen sumeiden sääntöjen avulla onnistuisi, on sääntöjen pystyttävä käsittelemään useita erilaisia liikennetilanteita. Simuloimalla oli helppoa luoda kattava kokoelma erilaisia liikennetilanteita. Sääntöjen muodostamiseen tarvitaan pistemittausten lisäksi tieto todellisesta liikennetiheydestä kyseisellä ajanhetkellä. Tätä tietoa on vaikea saada mitattua maastossa, mutta simulointimallissa se on helppoa. Simulointiohjelmana käytettiin mesoskoopista ARTIST-ohjelmaa (Advanced Research Tool for Indoor Simulation of Traffic). Neuroverkkolaskentaan puolestaan käytettiin NNSIM-ohjelmaa (Neural Network Simulator).

Sumean sääntökannan kehittämistä varten Manstetten ja Maichle (1996) tutkivat seitsemää erilaista liikennetilanneskenaariota. Nämä olivat

- Liikennemäärän vaihtelu
- Raskaan liikenteen osuuden vaihtelu
- Yhden kaistan sulkeminen 500 m matkalta keskimääräisellä liikennemäärällä
- Yhden kaistan sulkeminen 500 m matkalta ruuhkaliikenteessä
- Molempien kaistojen sulkeminen hiljaisen liikenteen aikana
- Molempien kaistojen sulkeminen keskimääräisellä liikennemäärällä
- Liikennemäärän pieni vaihtelu hiljaisen liikenteen aikana

Jokaista skenaariota simuloitiin viiden tunnin ajan 15 km moottoritiejaksolla. Pistemittauksia tehtiin mallista 500 m välein. Mittauspisteet jakoivat tiejakson 30 osaväliin. Simulointimallista tehtiin mittauksiin lisättiin satunnaisvirheeksi valkoista kohinaa, jolla mallinnettiin todellisessa liikenteen seurannassa syntyviä mittausvirheitä.

LIIKENNETILANTEEN ARVIOINTIIN SOVELTUVAT MENETELMÄT

Liikennetiheysestimaattia korjattiin pistenopeusmittausten avulla. Pistenopeutta mitattiin kunkin osavälin alku- ja loppupäässä. Pistenopeuksille, tiheysestimaatille ja tiheysestimaatin virheelle määritettiin kullekin viisi sumeaa joukkoa.

Kun osavälin alussa ja lopussa mitatut pistenopeudet olivat samansuuruiset, pääteltiin liikennetilanteen olevan vapaa. Tällaiseen tilanteeseen oli helppo muodostaa ilmaisuvirheistä johtuvaa liikennetiheysestimaatin virhettä korjaavat sumeat päättelysäännöt.

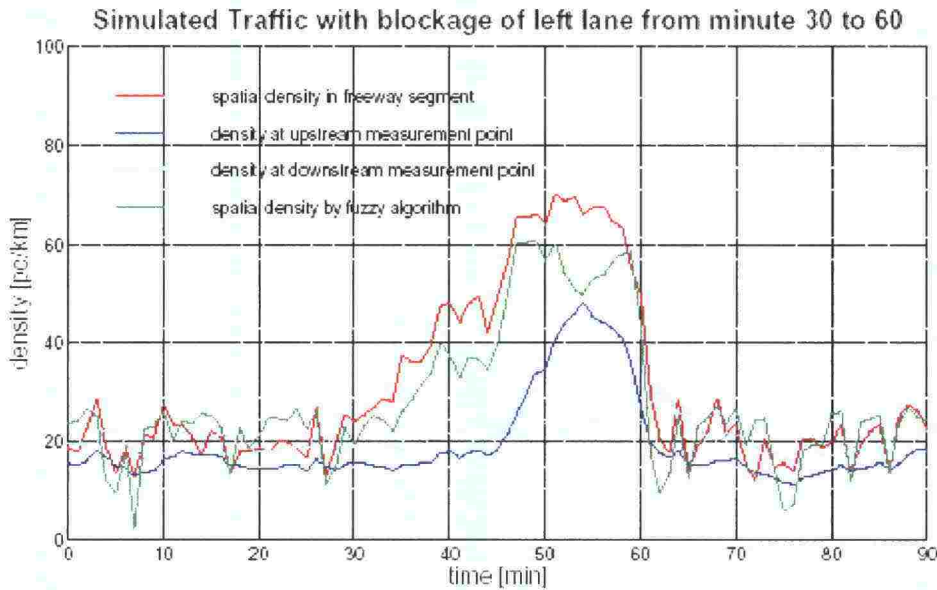
Kun pistenopeudet osavälin alussa ja lopussa olivat erisuuret, pääteltiin liikennetilanteen olevan epävaka. Epävakaan tilanteen sumeiden sääntöjen muotoilemiseen käytettiin apuna neuroverkkoja. Neuroverkkojen avulla muodostettiin 15 erilaista sumeaa sääntöä. Esimerkki säännöistä:

Jos nopeus osavälin alussa on keskimääräinen ja nopeus osavälin lopussa on korkea ja estimoitu tiheys on erittäin alhainen tai alhainen, niin tiheysestimaatin virhe on erittäin positiivinen.

Tällä säännöllä korjattiin liikennetiheysestimaattia ylöspäin, kun osavälille tulevan liikenteen nopeus oli poistuvan liikenteen nopeutta alempi ja liikennetiheyden alkuperäinen estimaatti oli alhainen.

Sumeiden sääntöjen toimintaa tarkasteltiin sekä maastomittausten että simulointien avulla. Maastosta saatiin liikennetietoa videoilmaisinten avulla. Ilmaisinten välimatka oli 2 km. Lähtötiedot kerättiin yhden tunnin jaksolta vapaan liikennetilanteen ajalta. Lähtötiedot sisälsivät satunnaisia ilmaisuvirheitä, koska videoilmaisinten virhe oli noin 6 %. Lisää virhettä aiheutui siitä, että liikennetiheyden alkuarvo oli tuntematon ja se asetettiin laskennassa arvoon 0 ajon/km. Todellista liikennetiheyttä ilmaisinten välillä ei ollut käytettävissä, joten sumean menetelmän tuottamaa tiheysestimaattia verrattiin vain ala- ja ylävirran ilmaisimilla arvioituun paikalliseen liikennetiheyteen. Paikallinen liikennetiheys laskettiin jakamalla liikennemäärä pistenopeudella. Vakaissa liikenneoloissa sumean logiikan avulla estimoitu liikennetiheys oli hyvin lähellä ylä- ja alavirrassa mitattuja liikennetiheyksiä.

Simulointikokeessa testattiin sumean logiikan tuottamaa liikennetiheysestimaattia myös häiriötilanteessa. Mittauspisteiden välimatka simulointimallissa oli 1500 m ja toinen kaista suljettiin ilmaisinten rajaaman osavälin puolivälissä. Ilmaisinvirheiden luomiseksi alavirran ilmaisin asetettiin havaitsemaan kaikki ajoneuvot, mutta ylävirran ilmaisin havaitsi vain 80 % ajoneuvoista. Tällaiset ilmaisinvirheet ilman sumeaa korjausta aiheuttavat varsin nopeasti tiheysestimaatin putoamisen nolnaan, koska poistuvia ajoneuvoja havaitaan paljon enemmän kuin saapuvia. Toisen kaistan sulkeminen aiheutti liikennevirtaan häiriötä, joten liikennetiheysestimaatin korjaamiseen käytettiin neuroverkkojen avulla muotoiltuja sumeita sääntöjä. Tilannetta tarkastellaan kuvassa 17. Kuvasta huomataan, että simuloinnin alussa ennen häiriön tapahtumista, sumeilla säännöillä täydennetty tiheysestimointi tuotti varsin hyviä tuloksia suuresta ilmaisuvirheiden määrästä huolimatta. Myös häiriötilanteessa sumean menetelmän tuottama liikennetiheysarvio noudatteli todellista liikennetiheyttä paljon paikallisia tiheysmittauksia paremmin.



Kuva 17. Eri menetelmillä estimoitu liikennetiheys häiriötilanteessa. Punainen = todellinen liikennetiheys, tummansininen = ylävirran ilmaisimella mitattu liikennetiheys, vaaleansininen = alavirran ilmaisimella mitattu liikennetiheys, vihreä = sumean logiikan avulla estimoitu liikennetiheys. (Manstetten ja Maichle 1996.)

3.3.8 Kalman-suodin

Kalman-suodin on R. E. Kalmanin vuonna 1960 julkaisema menetelmä, jonka tarkoituksena on yhdistää mallin antama tulos ja mittauksesta saatu tieto niiden luotettavuuden suhteessa. (Welch ja Bishop 2003.)

Systeemin tilaksi kutsutaan mitä tahansa kokoelmaa suureita, joka täyttää seuraavan ehdon: Kun tilan arvo tietyllä ajan hetkellä tunnetaan, voidaan ennustaa sen arvo kaikilla myöhemmillä ajanhetkillä, kun systeemiin vaikuttava ohjaus tunnetaan. Ohjauksella tarkoitetaan sellaisia muuttujia, joiden välityksellä ulkomaailma vaikuttaa systeemiin. Tila siis säilyttää kaiken systeemin kannalta oleellisen tiedon systeemin historiasta. Tilayhtälö kuvaa, miten tila seuraavalla ajanhetkellä riippuu ohjauksesta sekä tilasta edellisellä ajanhetkellä. (Holma 1991.)

Liikennetekniikan sovelluksissa tilana voidaan tarkastella esim. liikennetiheyttä, jolloin tilayhtälönä toimii jatkuvuusyhtälö. Ohjauksia ovat tällöin tiejaksoille tulevien ja siltä poistuvien ajoneuvojen lukumäärät. Malli ei välttämättä pysty kuvaamaan tilaa täysin luotettavasti, koska tilayhtälöön kuuluvat muuttujat saattavat sisältää virhettä. Esimerkiksi liikennetiheyden tapauksessa osa ajoneuvoista saattaa jäädä ilmaisinvirheiden takia havaitsematta. Malli antaa siis epätarkan tuloksen. Mallin virheen oletetaan olevan täysin satunnaista (valkoista kohinaa). Virheen mittana käytetään muuttujien kovariansseja. (Holma 1991, Welch ja Bishop 2003.)

Tilamuuttujia ei välttämättä voida mitata suoraan, mutta systeemistä saadaan saada mitattua sellaisia muuttujia, jotka ovat yhteydessä tilaan. Näiden mitattavien muuttujien yhteyttä tilaan kuvataan mittausyhtälöllä. Mallin lisäksi systeemin tilasta saadaan siis tietoa havaintojen kautta välillisesti. Havaintoihin vaikuttaa systeemin todellisen tilan lisäksi satunnainen mittausvirhe, jonka oletetaan myös olevan valkoista kohinaa. Mittausvirhe mallinnetaan mitattavien suureiden kovarianssien avulla. Kalman-suotimen antama tulos on kohtuullisen herkkä kovarianssien estimaateille. Kovarianssit määritetään usein järkeilemällä mittautulosten perusteella tai kokeilemalla. Liikennetiheydesimerkin tapauksessa mittaus voisi olla tiejakson alussa ja lopussa mitattujen ilmaisimien varausasteiden keskiarvo, jonka voidaan olettaa kuvaavan tiejakson liikennetiheyttä kohtalaisella tarkkuudella. (Holma 1991, Welch ja Bishop 2003.)

Systeemin tila estimoidaan ensin pelkkään malliin perustuen. Tähän tarvitaan arvio tilan alkuarvosta. Kun uusi havainto saadaan käyttöön, tilaestimaattia korjataan siihen perustuen. Kalman-vahvistus määräytyy mallin ja mittauksen kovarianssien perusteella. Mitä suurempi on mittauksen kovarianssi (virhe), sitä enemmän luotetaan malliin ja päinvastoin. Kalman-suodin löytää estimoitaville suureille mittauksen perusteella oikean tason, vaikka alkutilan estimaatti olisikin ollut huono. Liikennetiheyden tapauksessa jatkuvuusyhtälön antamaa liikennetiheydestimaattia korjataan siis varausastemittautietoihin perustuen. (Holma 1991, Welch ja Bishop 2003.)

Kalman-suodinteoria pätee vain lineaarisille systeemeille. Epälineaarisille systeemeille voidaan soveltaa laajennettua Kalman-suodinta, jossa epälineaarinen systeemi ensin linearisoidaan. Laajennettu Kalman-suodin ei kuitenkaan välttämättä takaa estimaatin konvergoimista todelliseen tilaan. (Welch ja Bishop 2003.)

3.3.9 Mittaustietojen yhdistäminen liikennevirtamalliin Kalman-suotimen avulla

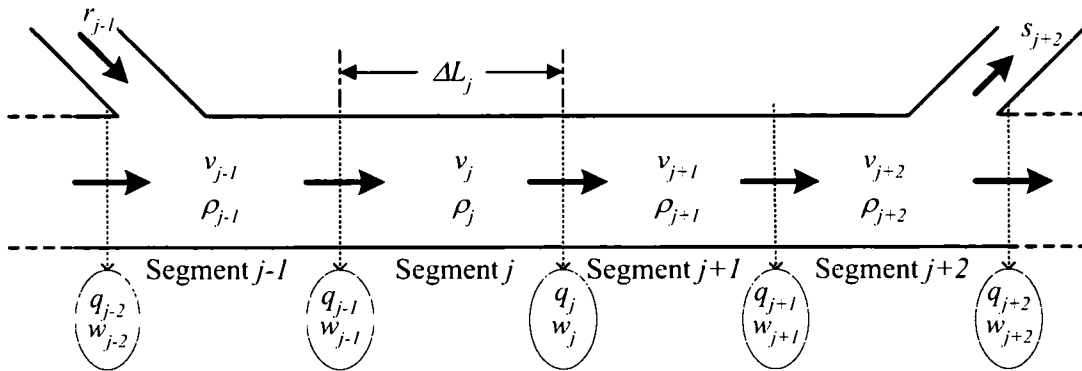
Tämä luku perustuu lähteeseen Nanthawichit (2003).

Nanthawichit (2003) on tutkinut liikennetilanteen arviointiin soveltuvaa menetelmää, jossa hyödynnetään makroskooppista liikennevirtamallia sekä ajantasaisia pistemittaustietoja anturiajoneuvotietoja.

Makroskooppiseksi malliksi Nanthawichit (2003) valitsi Paynen vuonna 1971 esittelemään malliin perustuvan mallin liikennetiheydelle, matkanopeudelle ja liikennemäärälle. Malli valittiin siksi, että yksinkertaisuudestaan huolimatta se ottaa huomioon mm. ajoneuvojen kiihdytyksen ja nopeuden sopeuttamisen vallitseviin liikenneoloihin. Malli ei kuitenkaan välttämättä pysty kuvaamaan liikennevirtaa kaikissa tilanteissa oikein, koska se kuvaa liikennevirran käyttäytymisen yksinkertaistetusti. Mallin tulos riippuu siitä, miten hyvin mallin parametrit on estimoitu. Parametrit eivät välttämättä ole vakioita, vaan muuttuvat liikennetilanteen ja tiegeometrian mukaan. Ilmaisinvirheet vaikuttavat osaltaan mallin tuloksen oikeellisuuteen. Liikennetilannearviota pyrittiin parantamaan yhdistämällä ajantasaiset mittaustiedot mallin tulokseen Kalman-suotimen avulla.

Tarkastelun kohteena oleva tiejakso diskretoitiin jakamalla se pienempiin osaväleihin (segment) (kuva 18). Mallissa liikennetilanteen (liikennemäärän, liikennetiheyden ja nopeuden) oletetaan olevan kunkin osavälin sisällä vakio. Mallin makroskooppiset muuttujat olivat

$\rho_j(t)$	liikennetiheys osavälillä j ajanhetkellä t
$v_j(t)$	matkanopeus osavälillä j ajanhetkellä t
$q_j(t)$	liikennemäärä osavälien j ja $j+1$ rajalla ajanhetkellä t
$w_j(t)$	pistenopeus osavälien j ja $j+1$ rajalla ajanhetkellä t
$r_j(t)$	rampilta tuleva liikenne osavälillä j ajanhetkellä t
$s_j(t)$	rampille poistuva liikenne osavälillä j ajanhetkellä t



Kuva 18. Tarkasteltava tiejakso diskretoidaan jakamalla se osaväleihin (segment) (Nanthawichit 2003).

Mallin tilayhtälöt olivat

$$\rho_j(t+1) = \rho_j(t) + \frac{\Delta t}{\Delta L_j} (q_{j-1}(t) - q_j(t) + r_j(t) - s_j(t))$$

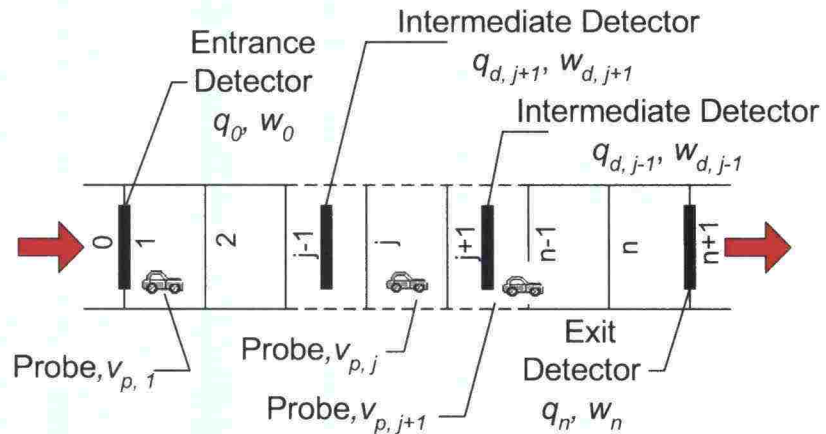
$$v_j(t+1) = v_j(t) + \frac{\Delta t}{\tau} \{v_e [\rho_j(t)] - v_j(t)\} + \frac{\Delta t}{\Delta L_j} v_j(t) [v_{j-1}(t) - v_j(t)] - \frac{\eta \cdot \Delta t}{\tau \Delta L_j} \frac{\rho_{j+1}(t) \lambda_j / \lambda_{j+1} - \rho_j(t)}{\rho_j(t) + \kappa}$$

$$q_j(t) = \alpha (v_j(t) \rho_j(t)) + (1 - \alpha) (v_{j+1}(t) \rho_{j+1}(t))$$

missä	Δt	laskentajakson pituus
	ΔL_j	osavälin j pituus
	λ_j	kaistojen lukumäärä osavälillä j
	τ	aikavakio
	κ	liikennetiheysvakio
	η	ennakointivakio
	v_e	nopeus tasapainotilassa
	α	painokerroin väliltä $0 \leq \alpha \leq 1$

Liikennemäärän tilayhtälö saa muotonsa siitä, että liikennemäärää mitataan osavälien reunalla. Poikkileikkauksen liikennemäärään vaikuttaa liikennetilanne sekä edeltävällä että seuraavalla osavälillä. Tilojen estimoimiseksi tarvitaan tieto tiejaksolle tulevasta ja siltä poistuvasta liikennemäärästä sekä liikennetiheyden ja nopeuden alkuarvot.

Mittaustietoina, joiden perusteella mallin antamia tuloksia korjattiin, käytettiin anturiajoneuvojen nopeutta ja pistemittausasemilla mitattuja pistenopeuksia ja liikennemääriä. Pistemittauksista oli joillakin osaväleillä ja mittauspisteet oli sijoitettu lähelle osavälien keskikohtia. Lisäksi mitattiin koko tieosalle tulevaa ja siltä poistuvaa liikennettä. Anturiajoneuvojen tietojen oletettiin olevan saatavilla tietyin aikavälein riippumatta ajoneuvon sijainnista. Kaikista mittaus-tiedoista käytettiin kolmen minuutin keskiarvoa satunnaisvaihtelun pienentämiseksi. Kuvassa 19 on havainnollistettu pistemittauksen ja anturiajoneuvotietojen käyttöä mittaustietoina.



Kuva 19. Pistemittausasemat ja anturiajoneuvot tiejaksolla (Nanthawichit 2003).

Osavälin keskipisteessä mitatun pistenopeuden ja liikennemäärän oletettiin kuvaavan kyseisen osavälin liikennetilannetta. Käyttämällä pistenopeutta matkanopeuden arvioimiseen tehdään virhe, jonka ei kuitenkaan oletettu tutkimusasetelmassa olevan kovin suuri, koska osavälit eivät olleet kovin pitkiä. Lisäksi virheen voidaan ajatella sisältyvän mittauskohinaan.

Tilanteissa, joissa pistemittauksia ei ollut, osavälin keskimääräisen matkanopeuden mittauksena käytettiin ko. osavälillä olevien anturiajoneuvojen keskinopeutta. Mikäli tietyltä osaväliltä oli saatavilla sekä pistemittauksia että anturiajoneuvotietoja, tiedot yhdistettiin käyttämällä painotettua keskiarvoa. Pistetietoa ja anturiajoneuvoista saatua tietoa tulisi painottaa niiden luotettavuuden suhteessa; tutkimuksessa painotettiin yksinkertaisuuden vuoksi molempia tekijällä 0,5.

Käytettävissä olevista tietolähteistä riippuen voidaan liikennetilanteen estimointiin erotella neljä erilaista tapausta:

Tapaus 1: Mittaustietoja saadaan vain tiejakson alussa ja lopussa (sekä mahdollisilla rampeilla) olevilta pistemittausasemilta.

Tapaus 2: Tiejakson alussa ja lopussa olevien pistemittausasemien lisäksi mittaustietoa saadaan myös tiejakson jollain osavälillä sijaitsevalta pistemittausasemalta

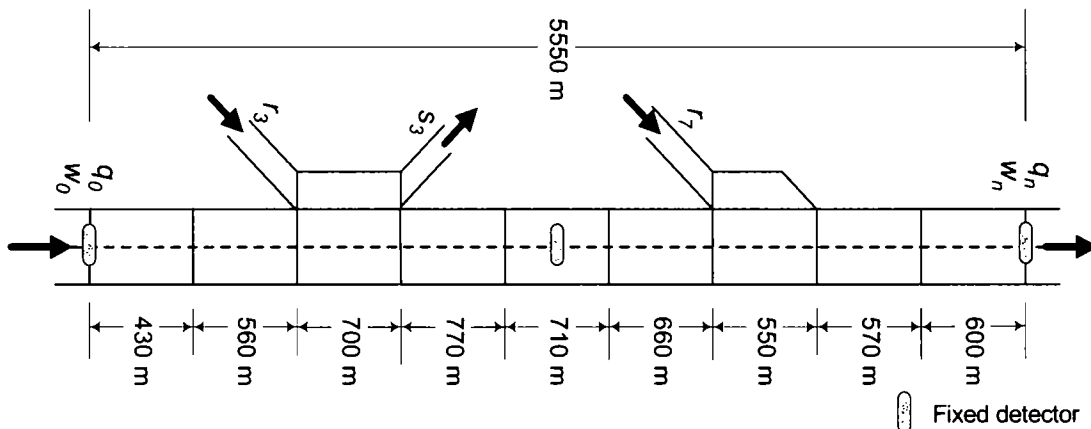
Tapaus 3: Tiejakson alussa ja lopussa olevien pistemittausasemien lisäksi mittaustietoa saadaan anturiajoneuvoilta.

Tapaus 4: Tiejakson alussa ja lopussa olevien pistemittausasemien lisäksi mittaustietoa saadaan myös tiejakson jollain osavälillä sijaitsevalta pistemittausasemalta sekä anturiajoneuvoilta.

Nanthawichitin käyttämässä mallissa tilayhtälöt ovat kaikissa tapauksissa samat, mutta mittausyhtälöt vaihtelevat sen mukaan, mitä mittaustietoa on käytettävissä. Malli- ja mittauskovarianssit Kalman-suodinta varten määritettiin kokeilemalla. Kohinan arveltiin olevan 2 – 10 % muuttujien arvosta.

Ehdotettua menetelmää testattiin simuloimalla INTEGRATION-simulointiohjelmalla. Tarkastelun kohteena oli noin 5,5 km pituinen tiejakso Tokion Metropolitan Expresswaylta (kuva 20). Tiejakso sisälsi kaksi tulo-rampia ja yhden poistumisrampin sekä kolme pistemittausasemaa. Tiejakso jaettiin yhdeksään 400 – 800 m pituiseen osaväliin. Simulointikokeessa anturiajoneuvoja oli 3 % liikenteestä. Testaamisessa käytettiin neljää eri liikennetilannetta, jotka olivat

- hiljainen liikenne
- ruuhkaliikenne
- hiljainen liikenne ja onnettomuus (kaista suljettu 15 min)
- ruuhkaliikenne ja onnettomuus (kaista suljettu 15 min)

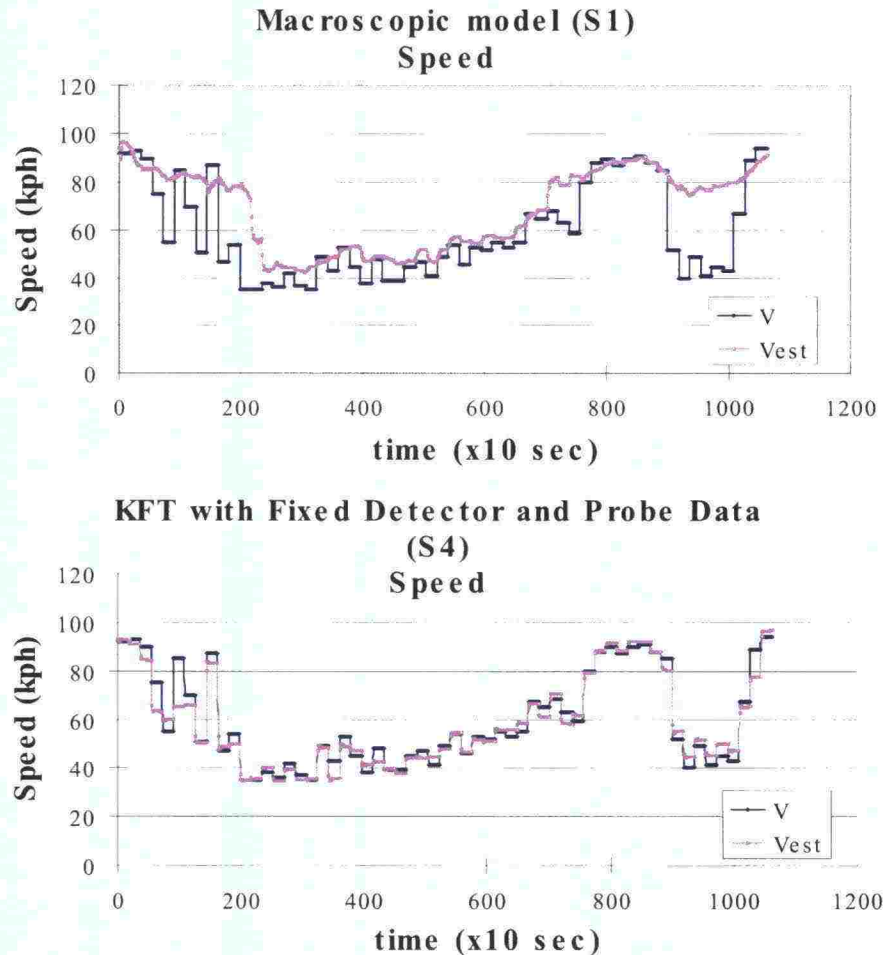


Kuva 20. Nanthawichitin (2003) simulointikokeessa käyttämä testialue.

Simulointitulosten perusteella paras tulos saatiin, kun makroskooppisen mallin lisäksi oli käytettävissä sekä pistemittauksia että anturiajoneuvotietoa. Etenkin anturiajoneuvojen nopeustietojen yhdistäminen makroskooppiseen malliin paransi liikennetiheys- ja matkanopeusestimaatteja huomattavasti. Alle 20 % estimoiduista tuloksista poikkesi yli 10 % todellisista arvoista.

Kuvassa 21 on esitetty estimoitu nopeus, kun käytössä oli vain makroskooppinen malli, ja kun käytössä oli myös sekä pistemittauksia että anturiajo-

neuvojen tietoa. Pelkällä makroskooppisella mallilla ei havaittu simuloinnin lopussa tapahtunutta nopeuden alenemista. Kun mittautustietoa oli käytettävissä, menetelmä estimoiti nopeuden varsin tarkasti.



Kuva 21. *Estimoitu ja todellinen nopeus, kun käytössä oli vain makroskooppinen malli (yläkuva) ja kun makroskooppiseen malliin yhdistettiin pistemittausasemilta ja anturiajoneuvoista saadut mittautustiedot (alakuva) (Nanthawichit 2003).*

Makroskooppiseen malliin ja pistemittaus- sekä anturiajoneuvotietoihin perustuvaa keskimääräisen matkanopeuden estimointia hyödynnettiin myös matka-aikojen arvioinnissa. Matka-ajat laskettiin estimoitujen matkanopeuksien perusteella yksinkertaisesti jakamalla kiinnostavan tieosan pituus estimoidulla nopeudella. Saatuja matka-aikaestimaatteja verrattiin yksinkertaisilla menetelmillä laskettuihin matka-aikoihin. Vertailumatka-ajat laskettiin joko käyttämällä anturiajoneuvojen matka-aikoja tai käyttämällä matkanopeutena osavälin päätepisteissä mitattujen pistenopeuksien keskiarvoa. Myös erilaisen ilmaisinsijoittelujen ja ilmaisinten määrän vaikutusta tutkittiin.

Pelkkiin pistemittautustietoihin perustuva menetelmä oli herkkä ilmaisimien määrälle, ja onnettomuustilanteet, joissa yksi kaista oli suljettu, aiheuttivat ongelmia. Anturiajoneuvojen matka-aikoihin perustuva menetelmä pärjäsikin hyvin, kun matka-ajan mittauspisteitä oli tarpeeksi tiheässä. Simulointitutki-

muksen pohjalta Nanthawichit toteaa, että makroskooppista mallia ja Kalman-suodinta käyttävä menetelmä antaa kilpailukykyisiä matka-ajan estimaatteja muihin menetelmiin verrattuna.

Kehitetyn menetelmän hyvä puoli on se, että sekä makroskooppinen liikennevirtamalli että Kalman-suotimeen perustuva ajantasaisen tiedon yhdistämistekniikka ovat malleina yksinkertaisia. Menetelmää on kuitenkin testattu vain simuloimalla yhdellä tiejaksolla, joten tulokset eivät ole yleistettävissä laajemmalle tieverkolle. Menetelmää ei ole voitu vielä testata maastossa, koska anturiajoneuvojen määrä Japanissa on vähäinen.

4 TUTKIMUSMENETELMÄ

4.1 Simulointitutkimukseen valitut menetelmät

4.1.1 Menetelmien valinta kirjallisuustutkimuksen perusteella

Kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin tarkemmin datafuusiomenetelmiin, liikennevirtamalleihin sekä menetelmiin, jotka hyödyntävät ainoastaan pisteseurantaa lähtötietoinaan. Simulointitutkimukseen päätettiin valita yksi menetelmä jokaisesta ryhmästä, koska haluttiin tutkia erityyppisiä menetelmiä, jotka käyttävät erilaista lähtötietoa.

Tutkimuksen naiivina vertailumenetelmänä käytetään linkin keskivaiheilla mitatun pistenopeuden yleistämistä matkanopeudeksi. Tämän lisäksi simulointikokeessa päätettiin testata toista pelkkään pistenopeuteen perustuvaa menetelmää, jossa nopeutta mitataan linkin päissä.

Liikennetiheyden estimointi pistemittausten ja jatkuvuusyhtälön avulla vaikuttaa kiinnostavalta, koska liikennetiheys on tieosakohtainen muuttuja, jonka ajantasainen seuranta on vaikeaa. Liikennetiheyttä voidaan itsessään käyttää kuvaamaan liikennetilannetta. Liikennetiheyden ja liikennemäärän avulla voidaan myös laskea matkanopeus, jota käytetään tässä työssä liikennetilanteen kuvaamiseen. Näistä syistä simulointikokeeseen otettiin mukaan yksinkertainen liikennevirtamalli. Pistenopeuteen perustuvat menetelmät valittiin myös siksi, että ne hyödyntävät nykyistä liikenteen seurantatekniikkaa (pisteseurantaa) ja ovat tämän takia käytännön sovelluksissa yksinkertaisia toteuttaa.

Liikennevirtamalli hyödyntää vain yhden tyyppistä pistemittaustietoa (ajoneuvomäärätietoa). Luotettavaan liikennetilannearvioon voidaan päästä myös yhdistämällä erityyppistä lähtötietoa erilaisilla datafuusiomenetelmillä. Bayesilaisen ja Dempster-Shafer -päätelyn käyttö parantaa onnistuessaan liikennetilannearvion luotettavuutta. Menetelmien vaatimien a priori -todennäköisyyksien määrittäminen eri tietolähteille on kuitenkin hankalaa.

Sumea logiikka vaikuttaa mielenkiintoiselta datafuusiomenetelmältä, koska sumeaan päättelyyn sisältyvät lingvistiset säännöt on helppo mieltää. Sumen sääntöjen ja jäsenyysfunktioiden muotoilu monimutkaisessa tilan-

TUTKIMUSMENETELMÄ

teessa on kuitenkin vaikeaa. Toimivan sumeaa logiikkaan perustuvan päätelyn luomiseksi tarvitaan riittävästi mittaustietoa ja muuta lähtötietoa tarkasteltavalta alueelta sekä tieto toteutuneesta liikennetilanteesta. Näin tarkasteltavan alueen lainalaisuuksia ja tyypillisiä liikennetilanteita pystytään analysoimaan systemaattisesti. Innamaa ym. (2002) tutkivat sumean logiikan käyttöä matka-ajan ennustamisessa etenkin kesäviikonloppuisin ruuhkautuvalla välillä Lahti–Heinola valtatiellä 4. Sumeiden sääntöjen muodostamisessa käytettiin apuna GUHA (General Unary Hypotheses Automaton) -työkalua, jonka avulla eri mittaustietojen välisiä riippuvaisuuksia analysoitiin järjestelmällisesti. Sumea logiikka tuotti Innamaan ym. (2002) tutkimuksessa kuitenkin huonommat ennusteet kuin samassa tutkimuksessa käytetty monikerroserseptroni- eli MLP-neuroverkko.

Kirjallisuustutkimuksessa havaittiin, että sumeaa logiikkaa on hyödynnetty liikennetilannearvioissa lähinnä neuroverkkojen yhteydessä, mutta ei yksinään. Neuroverkot sopivat käytettäväksi tilanteissa, joissa tietämys mallinnettavasta järjestelmästä ja sen lainalaisuuksista ei ole riittävää. Neuroverkot eivät tarvitse mitään etukäteistietämystä järjestelmästä, vaan oppivat sen ominaisuudet opetusprosessissa. Näistä syistä tässä tutkimuksessa päädyttiin tarkastelemaan sumean logiikan sijasta neuroverkkoja.

Kaikissa tarkasteluissa käytettiin vertailumenetelminä sekä yhden että kahden pisteen pistenopeusmenetelmiä. Näiden lisäksi tarkasteltiin joko liikennevirtamallia tai sekä liikennevirtamallia että neuroverkkoja.

4.1.2 Nykytilamalli: Yhden mittauspisteen menetelmä

Simulointikokeessa yksinkertaisimpana menetelmänä käytettiin linkin keskeillä yhdessä poikkileikkauksessa mitattujen pistenopeuksien keskiarvon yleistämistä linkin matkanopeudeksi. Kaistojen nopeuksia painotettiin niiden liikennemäärillä. Menetelmä vastaa liikennetilanteen arvioinnin nykytilaa, jossa liikennetilanneluokka määritetään pistenopeuden perusteella ja arvio yleistetään mittauspisteen lähialueen liikennetilanteeksi.

Simulointitutkimuksessa oli tavoitteena tarkastella, missä tilanteissa yksinkertainen yhden mittauspisteen menetelmä antaa tarpeeksi luotettavia tuloksia. Lisäksi tarkasteltiin, mitä lisäarvoa monimutkaisempien menetelmien käytöstä saadaan yhden mittauspisteen pistenopeuden käyttöön verrattuna. Pistenopeuteen perustuvasta yhden mittauspisteen menetelmästä käytetään raportissa lyhennettä PN 1.

4.1.3 Kahden mittauspisteen menetelmä

Toisessa pistenopeuteen perustuvassa, kahden mittauspisteen menetelmässä, pisteseurannan mittauspisteet sijaitsivat linkin alku- ja loppupäässä eli liittymien kohdilla. Matkanopeusestimaatti laskettiin olettamalla, että ajoneuvot ajavat linkin alussa mitattua nopeutta linkin puoliväliin ja jatkavat loppumatkan linkin lopussa mitatulla nopeudella. Laskennassa käytettiin mitattujen nopeuksien keskiarvoja. Kaistojen nopeuksia painotettiin niiden liikennemäärillä.

Tavoitteena oli tarkastella, saadaanko kahden mittauspisteen avulla yhtä mittauspistettä luotettavampi arvio matkanopeudelle. Lisäksi tarkasteltiin, kuinka paljon liittymissä mitatun pistenopeuden käyttö eroaa linkin keskellä mitatun pistenopeuden käytöstä. Pistenopeuteen perustuvasta kahden mittauspisteen menetelmästä käytetään raportissa lyhennettä PN 2.

4.1.4 Yksinkertainen liikennevirtamalli

Kolmantena menetelmänä simulointitutkimuksessa käytettiin yksinkertaista makroskooppista liikennevirtamallia, jossa liikennetiheys määritetään jatkuvuusyhtälöllä ja matkanopeus lasketaan liikennevirran perusyhtälöstä. Menetelmää esiteltiin tarkemmin luvussa 3.1.4.

Laskennassa käytettiin lähtötietoina tarkasteluajajakson aikana linkille tulleiden ja siltä poistuneiden ajoneuvojen määrää, josta arvioitiin liikennetiheys ja liikennemäärä.

Liikennevirran perusyhtälössä käytettävä liikennemäärä määritellään seuraavasti: Koko tiejakson keskimääräisen liikennemäärän laskemiseksi tiejakso jaetaan osiin, joissa kussakin ajoneuvomäärä on vakio koko tarkasteluajajakson T ajan. Tiejakson liikennemäärä lasketaan näiden painotettuna keskiarvona:

$$q = \sum_i q_i \frac{l_i}{L} = \sum_i \frac{n_i}{T} \cdot \frac{l_i}{L} = \frac{1}{LT} \sum_i n_i l_i$$

missä q koko tiejakson liikennemäärä
 q_i tiejakson osan i liikennemäärä
 l_i tiejakson osan i pituus
 L koko tiejakson pituus
 n_i ajoneuvojen lukumäärä tiejakson osalla i
 T tarkasteluajajakso

(Pursula ja Innamaa 2001.)

Näin määriteltyä keskimääräistä liikennemäärää ei kuitenkaan pystytä laskemaan ilmaisintiedoista, koska ajoneuvojen sijainti tiedetään vain silloin, kun ne ovat ilmaisimen kohdalla. Tämän takia liikennemäärä arvioitiin simulointitutkimuksessa tiejakson alusta ja lopusta saatavien mittaustietojen perusteella. Liikennemääräarviona käytettiin linkin alussa ja lopussa tarkasteluajan aikana mitattujen liikennemäärien keskiarvoa.

Vastaavasti liikennevirran perusyhtälössä käytettävä liikennetiheys määritellään seuraavasti: Tarkasteluajajakso T jaetaan osiin t_i , joiden kestäessä koko tiejaksolla on vakiomäärä ajoneuvoja. Tiejakson keskimääräinen liikennetiheys T :n mittaisen tarkasteluajajakson aikana saadaan eri liikennetiheyksien painotettuna keskiarvona:

TUTKIMUSMENETELMÄ

$$k = \sum_j k_j \frac{t_j}{T} = \sum_j \frac{m_j}{L} \cdot \frac{t_j}{T} = \frac{1}{LT} \sum_j m_j t_j$$

missä	k	tiejakson liikennetiheys aikana T
	k_j	aikajakson j liikennetiheys
	t_j	aikajakson j pituus
	T	tarkasteluaikajakso ($\Sigma t_j = T$)
	m_j	ajoneuvojen lukumäärä tiejaksolla aikajakson i aikana
	L	tiejakson pituus

(Pursula ja Innamaa 2001.)

Jos oletetaan, ettei ilmaisinvirheitä ole ja liikennetiheyden alkuarvo on arvioitu oikein, tiejakson keskimääräinen liikennetiheys edellisestä päivityshetkestä alkaneen aikajakson aikana saadaan laskettua tarkasti. Liikennetiheysestimaattia ja liikennetilanteen arviota voitaisiin simulointitutkimuksessa päivittää aina tiejakson liikennetiheyden muuttuessa. Edellä todettiin, että liikennemäärää ei kuitenkaan pystytä arvioimaan yhtä tarkasti. Tästä syystä liikennetilanteen estimaattia päivitettiin tutkimuksessa vain tietyn tarkasteluaikajakson välein ja myös liikennetiheydelle lasketaan vain hetkellinen arvo jokaisen tarkasteluaikajakson lopussa. Myös käytännön sovelluksissa voi olla helpompaa päivittää tilannetta tietyn ajan välein eikä jokaisen mittaustuloksen perusteella.

Liikennevirtateoriaan perustuvaa menetelmää käytettäessä oletetaan, että tiejakson liikennetiheys on homogeeninen. Jotta näin voitaisiin olettaa, seurantajaksojen muutoskohdat tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle rampeja. Tämä sopii tutkimuksen lähtökohtiin hyvin, koska tavoitteena on muodostaa liikennetilannearvio nimenomaan liittymäväleittäin.

Matkanopeuden estimointi aloitettiin simulointitutkimuksessa heti simulointiajan alusta, jolloin malli oli vielä tyhjä. Tällöin liikennevirtamallissa tarvittava liikennetiheysestimaatti lasketaan oikein eli laskenta aloitetaan hetkellä, jolloin linkillä ei ole yhtään ajoneuvoa ja liikennetiheyden alkuarvoksi saadaan 0 ajon/km. Käytännön sovelluksissa tällaisen ajanhetken löytäminen voi olla vaikeaa, mutta ainakin yöllä tällaisen hetken voidaan olettaa löytyvän helpommin. Mahdollinen virhe liikennetiheyden alkuarvossa näkyy samansuuisena koko estimoinnin ajan.

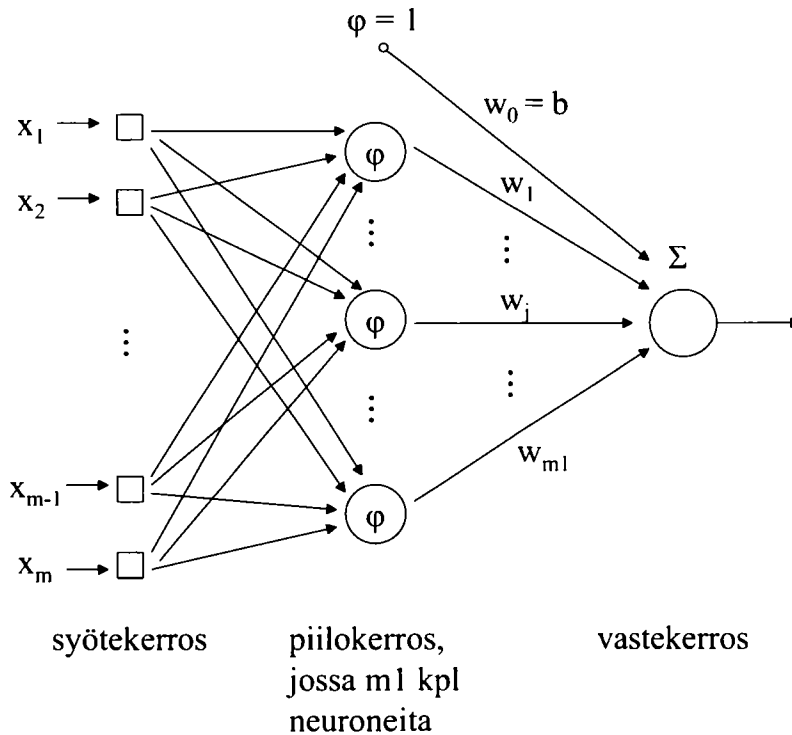
Liikennevirtamallin toimintaa testattiin simulointikokeessa ensin olettamalla, että ilmaisinvirheitä ei ole. Tämän jälkeen tarkasteltiin tapauksia, joissa ilmaisimet jättivät osan ajoneuvoista havaitsematta. Ilmaisinvirheiden vaikutuksen vähentämiseksi kehitettiin kaksi päättelysääntöihin perustuvaa menetelmää, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 4.9.

Liikennevirtamallista käytetään raportissa lyhennettä LVM.

4.1.5 Radiaalikantafunktioneuroverkko (RBF)

Neuroverkkona käytettiin RBF- eli radiaalikantafunktioverkkoa (Radial Basis Function network). RBF-neuroverkko on yhdestä syötekerroksesta, piilokerroksesta ja vastekerroksesta koostuva verkko, jossa piilokerroksen neuronien aktivaatiofunktiot ovat erityistä radiaalikantafunktiotyyppiä, mikä tarkoittaa

sitä, että funktio saa saman arvon jokaisessa pisteessä, joka on yhtä kaukana ns. keskipisteestä toimivasta opetuspisteestä. Periaatekuva RBF-neuroverkosta on esitetty kuvassa 22. Syötekerros ottaa vastaan verkolle annettavat syötteet. Vastekerros puolestaan antaa syötettä vastaavan verkon ulostulon eli vasteen. (Haykin 1999, Koikkalainen ja Oja 1994.)

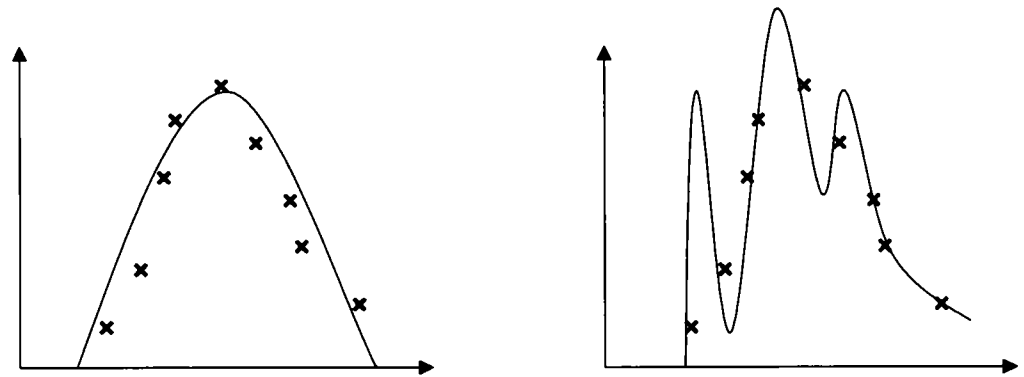


Kuva 22. Periaatekuva RBF-neuroverkosta (Haykin 1999).

RBF-neuroverkon oppiminen tapahtuu ohjatusti. Ohjattu oppiminen tarkoittaa sitä, että neuroverkolle syötetään opetuspisteitä sekä kunkin opetuspisteen haluttu vaste. Opetuspiste on vektori, joka koostuu lähtötietoina eli syöteinä käytettävistä muuttujista. Vaste puolestaan on muuttuja, jonka riippuvuutta syötteistä tarkastellaan, eli tässä tapauksessa matkanopeus. (Haykin 1999.)

RBF-verkon tapauksessa osa opetuspisteistä valitaan ns. keskipisteiksi, joiden avulla neuroverkko muodostaa opetusdatasta epälineaarisen kuvauksen. Jokaista keskipistettä vastaa piilokerroksessa yksi neuroni. Opetusdataa on oltava tarpeeksi paljon keskipisteiden määrään nähden, ettei ylioppimista tapahdu, vaan neuroverkon yleistyskyky saadaan hyväksi. Jos opetusdataa on liian vähän, neuroverkko sovittaa opetusdataan funktion, joka kulkee liian tarkasti opetuspisteiden kautta. Tällöin neuroverkko saattaa antaa täysin vääriä tuloksia. Esimerkki ylioppimisesta on esitetty kuvassa 23. (Haykin 1999.)

TUTKIMUSMENETELMÄ



Kuva 23. Esimerkki ylioppimisesta. Funktion oikea muoto on lähellä paraabelia, mutta neuroverkko sovittaa opetuspisteisiin korkeampiasteisen epälineaarisen funktion. (Haykin 1999.)

RBF-verkkojen neuroneiden aktivaatiofunktio, eli funktiot, jotka määräävät, miten neuronin vaste määräytyy syötteiden perusteella, ovat usein Gaussin kellokäyrän muotoisia. Aktivaatiofunktiolle annetaan parametriksi opetuspisteen etäisyys valituista keskipisteistä:

$$\varphi_i(\bar{x}) = G(\|\bar{x} - \bar{i}_i\|), \quad i = 1, 2, \dots, m_I$$

missä φ_i neuronin i aktivaatiofunktio
 \bar{x} opetusdatan piste

G Gaussin kellokäyrän funktio $\exp\left(-\frac{\|\bar{x} - \bar{i}_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$

\bar{i}_i keskipiste

Neuroverkon oppiminen tapahtuu painokertoimissa w_j tapahtuvina muutoksina. Verkon antama vaste on painotettu summa neuroneiden aktivaatiofunktioiden vasteista. Verkon oppimistulos riippuu keskipisteiden valinnan onnistumisesta. Lähtödatassa saattaa esiintyä esim. mittausvirheistä johtuvia satunnaisia virheitä. Tällöin olisi hyvä, että keskipisteet olisivat kuitenkin mahdollisimman virheettömiä. (Haykin 1999, Koikkalainen ja Oja 1994.)

RBF-verkot eivät pohjimmiltaan eroa suuresti yleisesti käytetystä monikerroserperseptroni- eli MLP-verkoista. Suurin ero on kerrosten yhdistämisessä – MLP:ssä käytetään sisätuloja, kun taas RBF:ssä lasketaan etäisyyttä. RBF-neuroverkon rakenne on yksinkertaisempi ja helpompi hahmottaa. RBF-neuroverkkoja käytetään useimmiten approksimoimaan monimutkaisia epälineaarisia funktioita tilanteissa, joissa lähtöavaruus on monidimensioinen. RBF-neuroverkkoja lyhyen ajan liikenne-ennusteissa ovat tutkineet ainakin Huiskien ja van Maarseveen (2000), jotka totesivat niiden tuottavan yhtä hyvät ennusteet kuin MLP-neuroverkot, sumea logiikka ja ARIMA-malli. (Haykin 1999, Huiskien ja van Maarseveen 2000.)

Radiaalikantafunktioneuroverkoista käytetään raportissa lyhennettä RBF.

4.2 Simulointi tutkimusmenetelmänä

Simuloinnilla tarkoitetaan yleisesti jonkin todellisen ilmiön tai järjestelmän jäljittelemistä tietokonemallin avulla. Simulointimallinnus on dynaamista, eli simuloinnissa seurataan tarkasteltavan ilmiön muutoksia ajassa. Simuloinnin avulla voidaan tarkastella yksityiskohtaisemmin tilanteita, joiden käsittely matemaattisten menetelmien avulla on mahdollista vain yksinkertaistetussa muodossa. Simuloinnin tuloksena ei saada matemaattista ratkaisua vaan analyysi tapahtuu seuraamalla mallin toimintaa ja tarkastelemalla tuloksia tilastollisesti. Simulointia käytetään usein sellaisten ilmiöiden tarkasteluun, joihin liittyy satunnaisuutta. (Pursula 1982.)

Simuloimalla voidaan vertailla erilaisia liikenneteknisiä ratkaisuja täsmälleen samassa liikennetilanteessa, mikä ei ole mahdollista maastossa, koska liikenne sisältää paljon satunnaisvaihtelua. Simuloimalla suunniteltujen ratkaisujen toiminta voidaan testata etukäteen ilman kalliita infrastruktuuriin tehtäviä investointeja. Simulointitutkimusten suorittamista vaikeuttaa monipuolisten lähtötietojen tarve. Luotettavien tulosten aikaansaamiseksi simulointimallin tulee olla huolellisesti kalibroitu ja validoitu. (Kosonen 1999, Pursula 1982.)

4.3 Hutsim-simulointiohjelman mallinnusperiaatteet

Hutsim on liikenteen mikrosimulointiohjelmisto, joka on kehitetty Teknillisen korkeakoulun Liikennelaboratoriossa. Hutsim perustuu ns. oliopohjaiseen mallinnus- ja ohjelmointitekniikkaan. Hutsimin ajodynamiikka on mallinnettu sääntöihin pohjaavalla ajoneuvonseurannalla, jossa jokaista ajoneuvoa käsitellään yksilöllisesti. Yksittäisen ajoneuvon nopeus määräytyy tavallisesti edellä ajavan ajoneuvon nopeuden ja etäisyyden perusteella. Hutsim-mallilla voidaan tarkastella henkilöautoja ja raskasta liikennettä sekä joukko- ja kevyttä liikennettä ja se soveltuu erilaisten liikenneympäristöjen simulointiin. Hutsimilla on simuloitu erilaisia valo-ohjauksisia ja -ohjauksettomia liittymiä, moottoriteitä sekä kiertoliittymiä. (Kosonen 1999.)

4.4 Hutsim- ja Matlab-ohjelmien käyttö tutkimuksessa

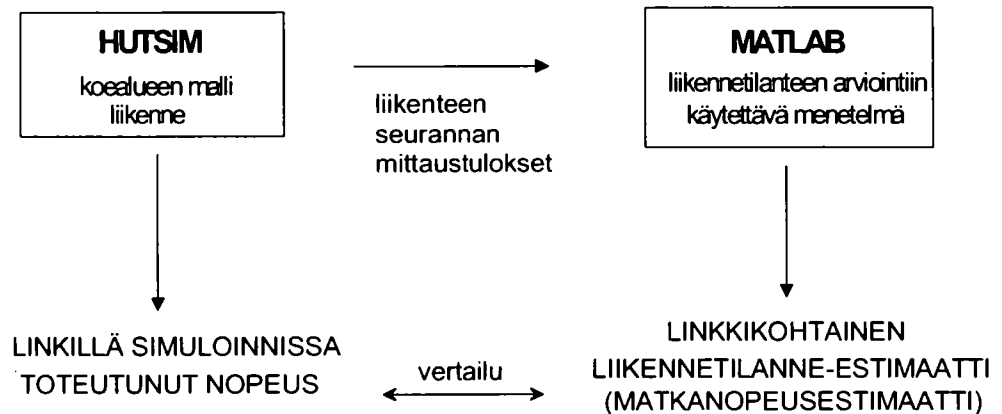
Koska matkanopeuden tai muiden tieosakohtaisten parametrien saaminen selville maastossa on vaikeaa, linkkikohtaisen liikennetilanteen estimoimiseen käytettäviä menetelmiä testattiin käyttämällä Hutsim-ohjelmistolla simuloitua liikennettä.

Hutsim-malli edusti todellista liikennettä. Mallista mitattiin liikennetietoja (havaintoja), jotka vastaavat muodoltaan oikeaa mittaustietoa (kuten liikennemääriä, pistenopeuksia ja ilmaisimen varausastetta). Simuloinnin tuloksena saatiin Hutsimin ajoneuvokohtainen tulostiedosto (delay-tiedosto), johon on tallennettu jokaisen ajoneuvon ylitys kullakin ilmaisimella. Jokaisen ylitystiedon kohdalla on myös muuta tietoa ajoneuvosta, kuten sen kokemat viivytykset ja sen pistenopeus ilmaisimen kohdalla. Tulostiedoston tiedoista laskettiin valituilla menetelmillä linkkikohtaiset sujuvuusestimaatit (matkano-

TUTKIMUSMENETELMÄ

peudet). Menetelmät toteutettiin Matlab-ohjelmistolla, johon Hutsimin tuottama tulostiedosto luettiin.

Hutsim-mallista mitattiin simuloinnissa toteutunutta linkin matka-aikaa, josta laskettiin linkkikohtainen matkanopeus, joka edusti todellista, toteutunutta matkanopeutta. Eri laskentamenetelmien tuottamia matkanopeusestimaatteja verrattiin Hutsimissa toteutuneisiin matkanopeuksiin. Hutsimin ja Matlabin käyttöä tutkimuksessa on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 24. Hutsim- ja Matlab-ohjelmistojen käyttö liikennetilanteen arvioinnin testaamisessa.

Simuloinnin etuna on se, että menetelmiä voidaan testata systemaattisesti useilla erilaisilla liikennetilanteilla. Simulointimallilla voidaan helposti generoida sellaisia liikennetilanteita, joita esiintyy maastossa harvoin. Lisäksi voidaan tarkastella mittauspisteiden sijoittamisen ja määrän vaikutusta tuloksiin.

Johtopäätöksiä tehtäessä on muistettava, että testaamiseen käytettiin vain simulointiohjelmaa. Tuloksiin vaikuttaa se, kuinka tarkasti Hutsim-malli onnistuu kuvaamaan todellista liikenneympäristöä ja todellisia liikennetilanteita. Hutsim-malli sisältää useita parametreja, kuten ajoneuvojen hyväksymien aikavälien ja tavoitenopeuksien jakaumat, joilla on oma vaikutuksensa mallin liikenteen käyttäytymisen todenmukaisuuteen. Vaikka Hutsimin parametrit on kalibroitu huolellisesti maastomittauksia käyttämällä ja ohjelmaa on kehitetty mallintamaan tarkasti myös moottoritie liikennettä, simulointitutkimuksessa joudutaan tekemään aina joitain oletuksia ja yksinkertaistuksia. Esimerkiksi liikenteen seurannan mittausvirheiden mallinnus on yksi tällainen yksinkertaistus.

Simulointitutkimuksessa esiintyvät ongelmat poikkeavat maastomittauksin tehdyn tutkimuksen ongelmista. Maastotutkimuksissa mittaustiedot sisältävät tuntemattoman suuruisen virheen, mutta simuloinnissa mittaustulokset ovat virheettömiä. Maastossa todellisen matka-ajan saaminen selville on vaikeaa, mutta simulointikokeessa helppoa. Simuloinnissa liikennevirta saattaa käyttäytyä todellisuutta homogeenisemmin. Koeasetelmat eivät välttämättä vastaa maastossa esiintyviä tilanteita ja esim. realististen liikennemäärien syöttämiseksi tarvitaan mittaustietoa liikennemääristä maastosta.

Menetelmiä testattiin vain yhdellä yksinkertaisella mallilla, joten menetelmien toimivuudesta voidaan tehdä päätelmiä vain testiympäristön kaltaisissa ympäristöissä. Menetelmien testaaminen kenttäkokeessa jää jatkotutkimuksen aiheeksi.

4.5 Todellisen matkanopeuden määritelmä

Tieosan $[x_1, x_2]$ matkanopeus määritellään tiejaksolla aikavälillä $[t_1, t_2]$ toteutuneena keskimääräisenä matkanopeutena. Keskimääräinen matkanopeus (\bar{v}) tietyssä ajanjaksona määritellään kaikkien ajoneuvojen kulkemien matkojen summan ja niiden matka-aikojen summan osamääränä (Pursula ja Innamaa 2001).

Harhaton estimaatti keskimääräiselle matkanopeudelle \bar{v} voidaan laskea seuraavasti:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{n=1}^N \{ \min(x_{t_2}^n, x_2) - \max(x_{t_1}^n, x_1) \}}{\sum_{n=1}^N \{ \min(t_2, t_{x_2}^n) - \max(t_1, t_{x_1}^n) \}} \quad (10)$$

- missä
- $x_{t_1}^n$ n :nnen ajoneuvon paikka hetkellä t_1
 - $x_{t_2}^n$ n :nnen ajoneuvon paikka hetkellä t_2
 - x_1 ensimmäisen mittauspisteen paikka
 - x_2 toisen mittauspisteen paikka
 - $t_{x_1}^n$ ajanhetki, jolloin ajoneuvo n ohittaa ensimmäisen mittauspisteen
 - $t_{x_2}^n$ ajanhetki, jolloin ajoneuvo n ohittaa toisen mittauspisteen
 - N ajoneuvojen määrä tiejaksolla tarkastellun ajanjakson aikana

4.6 Simulointitutkimuksessa toteutunut matkanopeus

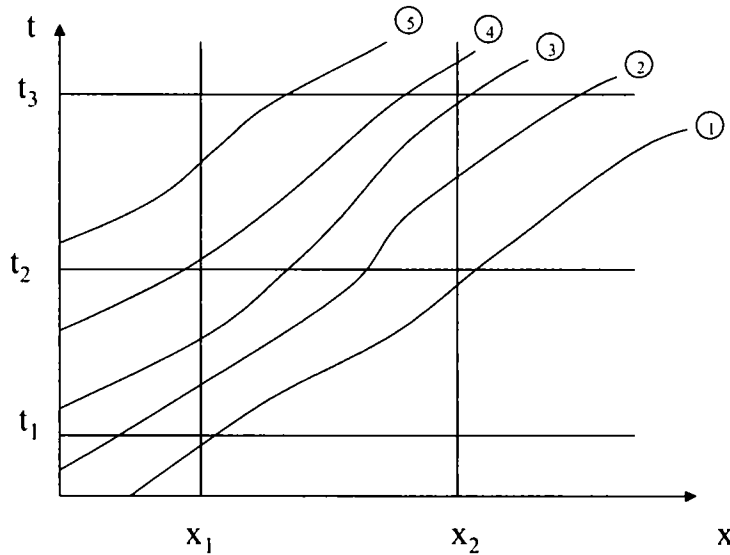
Simulointitutkimuksessa ei saada ilmaisintiedoista selville kaavan (10) mukaista todellista matkanopeutta. Usein tietyn aikavälin Δt matkanopeutta (tai -aikaa) mitataan laskemalla kyseisen aikavälin aikana seurantajakson loppuun tulleiden ajoneuvojen matkanopeuksien (-aikojen) keskiarvo. Tällainen laskutapa ei välttämättä tuota kaikkein kuvaavinta arviota kyseisen aikavälin matkanopeudesta, koska ajoneuvot, joiden matkanopeutta laskennassa käytetään, ovat saattaneet olla tiejaksolla vain hyvin pienen osan kyseisestä aikavälistä. Ne ajoneuvot, jotka tulevat perille aikavälin alussa, viettivät suurimman osan ajasta tiejaksolla edellisellä aikavälillä. Näiden ajoneuvojen matkanopeus kuvaakin enemmän edellisen aikavälin matkanopeutta. Ongelma korostuu, kun tarkasteltava tiejakso on pitkä ja matkanopeusarviota päivitetään usein.

Aikavälin Δt aikana perille tulleiden ajoneuvojen matkanopeuksien sijaan simulointitutkimuksessa toteutunut matkanopeus laskettiin painotettuna kes-

TUTKIMUSMENETELMÄ

kiarvona niiden ajoneuvojen matkanopeuksista, jotka olivat kulkeneet linkillä kyseisellä aikavälillä. Toteutunut matkanopeus linkillä $[x_1, x_2]$ aikavälille $[t_1, t_2]$ laskettiin niistä ajoneuvoista, jotka olivat ajanhetkellä t_1 ylittäneet ilmaisimen poikkileikkauksessa x_1 , mutta eivät vielä ilmaisinta poikkileikkauksessa x_2 , sekä niistä ajoneuvoista, jotka ylittivät ilmaisimen poikkileikkauksessa x_1 kyseisen aikavälin aikana. Pitkällä linkillä ja lyhyellä matkanopeusestimaatin päivitysvälillä tällainen laskutapa johtaa siihen, että samoja ajoneuvoja käytetään usean aikavälin toteutuneen matkanopeuden laskemiseen.

Kuva 25 havainnollistaa toteutuneen matkanopeuden laskentaan käytettäviä ajoneuvoja. Matkanopeus aikavälillä $[t_1, t_2]$ lasketaan ajoneuvoista 1 (linkillä jo ajanhetkellä t_1) sekä 2 ja 3 (tulevat linkille aikavälillä $[t_1, t_2]$). Aikavälille $[t_2, t_3]$ matkanopeus puolestaan lasketaan ajoneuvojen 2 ja 3 (linkillä jo ajanhetkellä t_2) sekä 4 ja 5 matkanopeuksista (tulevat linkille aikavälillä $[t_2, t_3]$).



Kuva 25. Toteutunut matkanopeus lasketaan aikavälillä $[t_1, t_2]$ ajoneuvojen 1 ja 2 matkanopeuksista ja aikavälillä $[t_2, t_3]$ ajoneuvojen 2,3,4 ja 5 matkanopeuksista.

Ajoneuvojen matkanopeuksista ei laskettu suoraan aritmeettista keskiarvoa, vaan matkanopeuksia painotettiin sen mukaan, kuinka suuren osan aikavälistä ajoneuvo oli linkillä ollut:

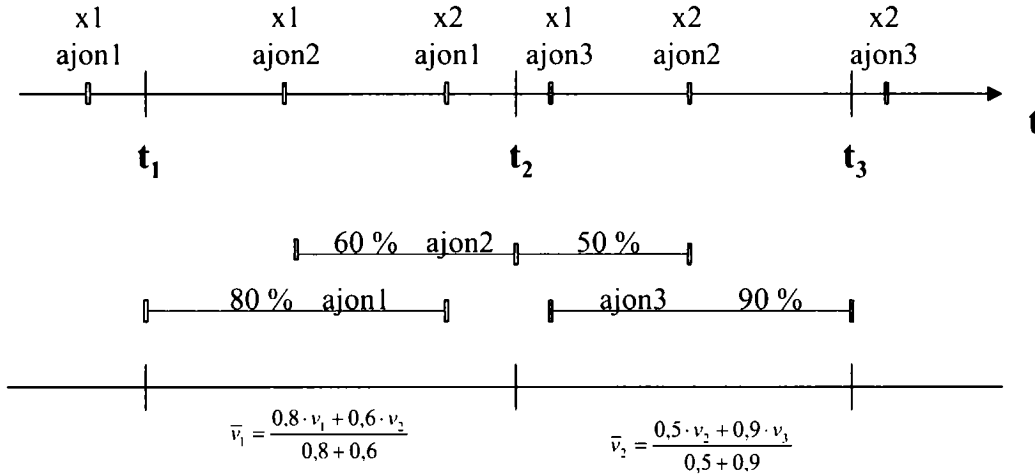
$$\bar{v}_j = \frac{\sum b_{ij} v_i}{\sum b_{ij}}$$

missä \bar{v}_j aikavälin j keskimääräinen matkanopeus
 b_{ij} ajoneuvon i linkillä aikavälillä j viettämä osuus
 v_i ajoneuvon i matkanopeus

Esimerkiksi jos ajoneuvo tulee linkille aikavälin puolivälissä, saa sen matkanopeus linkillä painon 0,5.

Simuloinnissa toteutuneen matkanopeuden laskemista on havainnollistettu kuvassa 26. Matkanopeus aikavälillä $[t_1, t_2]$ lasketaan ajoneuvoista 1 ja 2.

Ajoneuvo 1 käyttää aikavälistä $[t_1, t_2]$ linkillä 80 % ja ajoneuvo 2 käyttää 60 %. Täten ajoneuvon 1 linkin matkanopeutta painotetaan kertoimella 0,8 ja ajoneuvon 2 kertoimella 0,6. Aikavälin $[t_2, t_3]$ matkanopeuden laskentaan käytetään puolestaan ajoneuvoja 2 ja 3. Ajoneuvo 2 on linkillä 50 % aikavälistä $[t_2, t_3]$ ja ajoneuvo 3 puolestaan 90 %. Vastaavasti niiden matkanopeuksien painokertoimet ovat 0,5 ja 0,9.



Kuva 26. Esimerkki toteutuneen matkanopeuden laskemisesta.

Oletetaan, että ajoneuvon 1 matkanopeus on 100 km/h, ajoneuvon 2 matkanopeus 90 km/h ja ajoneuvon 3 matkanopeus on 80 km/h. Ensimmäisen aikavälin matkanopeudeksi saadaan tällöin

$$v(t_1) = \frac{0,8 \cdot 100 \text{ km/h} + 0,6 \cdot 90 \text{ km/h}}{0,8 + 0,6} = 95,7 \text{ km/h}$$

ja toisen aikavälin matkanopeudeksi vastaavasti

$$\bar{v}(t_1) = \frac{0,5 \cdot 90 \text{ km/h} + 0,9 \cdot 80 \text{ km/h}}{0,5 + 0,9} = 83,6 \text{ km/h}.$$

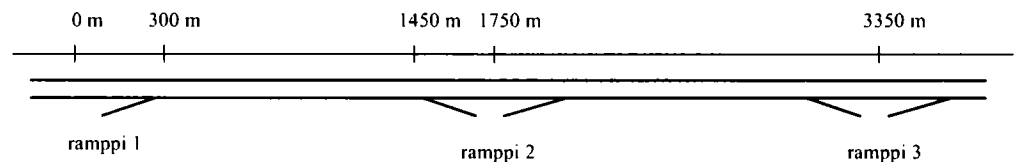
Tässä esitetyllä tavalla tietyn aikavälin matkanopeutta ei voida laskea välittömästi aikavälin lopussa, vaan vasta, kun kyseisellä aikavälillä linkillä olleiden ajoneuvojen matkanopeusmittaus saadaan käyttöön. Simulointitutkimuksessa tämä ei kuitenkaan aiheuta ongelmia, koska tuloksia ei tarkastella reaaliajassa. Etuna on se, että pistemittautustietojen ja matkanopeuden määrittämiseen käytettiin todella samaa aikajaksoa.

Simuloinnissa toteutuneesta nopeudesta käytetään raportissa lyhennettä TN.

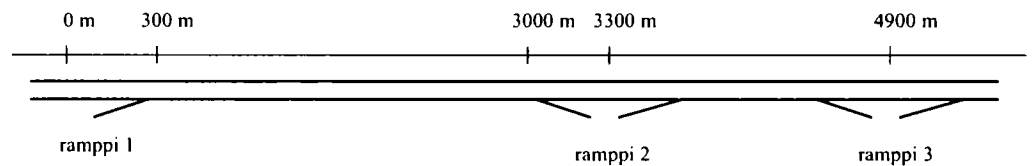
4.7 Koeasetelma

4.7.1 Koealue

Simulointitutkimus suoritettiin yksinkertaisella kuvitteellisella moottoritien toisen ajoradan sisältävällä kaksikaistaisella mallilla, joka on esitetty kuvassa 27. Malli sisälsi kaksi poistumis- ja kolme liittymisramppia eli muodostui kahdesta linkistä. Ensimmäisen linkin pituus oli 1,75 km ja toisen linkin 1,6 km. Liikennetilannetta eli matkanopeutta estimoitiin kaikilla menetelmillä mallin ensimmäiselle linkille. Joitakin tilanteita tarkasteltiin myös vastaavalla Hutsim-mallilla, jossa ensimmäisen linkin pituus oli 3,3 km (kuva 28). Neuroverkkoja testattiin vain lyhyemmällä linkillä.



Kuva 27. Kahden linkin moottoritiemalli. Ensimmäisen linkin pituus 1,75 km.



Kuva 28. Kahden linkin moottoritiemalli. Ensimmäisen linkin pituus 3,3 km.

Mallissa nopeusrajoituksena käytettiin 100 km/h, joka on tyypillinen nopeusrajoitus moottoriteillä kaupunkien lähellä. Käytännössä on osoittautunut, että liikennevirran vapaa nopeus on tällöin noin 94-96 km/h tiejakson geometriasista riippuen. Tässä vapaaksi nopeudeksi valittiin 95 km/h, jolloin Tiehallinnon käyttämän sujuvuusluokittelun (Tiehallinto 2001) rajat muodostuvat taulukon 6 mukaiseksi.

Taulukko 6. Sujuvuustasojen rajat simulointitutkimuksessa.

	Nopeustaso km/h
Liikenne sujuvaa	> 85,5
Liikenne jonoutunut	71,5 - 85,5
Liikenne hidasta	24-71,5
Liikenne pysähtelee	9,5 - 24
Liikenne seisoo	< 9,5

Hutsim-mallissa poistumisramppi 2 mallinnettiin geometrialtaan tiukaksi. Tämä toteutettiin asettamalla rampille pääsuuntaa alhaisempi nopeusrajoitus.

tus. Näin rampille poistuvat ajoneuvot hidastavat nopeuttaan hieman jo ennen ramppia, mikä aiheuttaa häiriötä pääsuunnan liikennevirtaan.

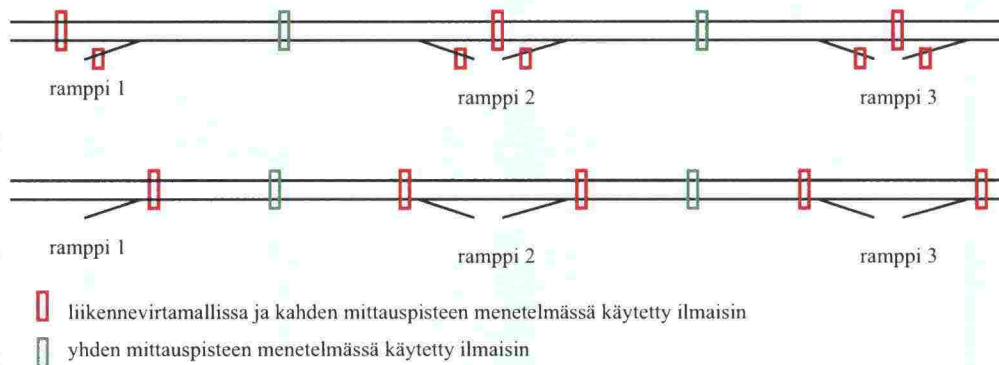
Häiriötilanteet mallinnettiin sulkemalla mallista toinen kaista 50 m matkalta. Kun häiriö oli linkin keskellä, mallista suljettiin oikea kaista. Häiriön sijaitessa liittymässä, mallista suljettiin vasen kaista, koska oikean kaistan sulkeminen olisi vaikeuttanut liittyvän tai poistuvan liikenteen mallintamista.

4.7.2 Ilmaisinsijoittelu

Liikennevirtamalli ja pistenopeusmenetelmät

Liikennevirtamallin käyttö vaatii, että kaikki linkille tuleva ja siltä poistuva liikenne mitataan, joten ilmaisinsijoittelussa on kaksi vaihtoehtoa. Ilmaisimet voidaan sijoittaa kaikkiin liittymiin liittymän keskelle ja kaikille rampeille. Toinen vaihtoehto on sijoittaa ilmaisimain päätielle liittymisrampin jälkeen ja juuri ennen seuraavaa poistumisramppia.

Yhden mittauspisteen menetelmässä ilmaisimain oli sijoitettu linkin keskelle. Kahden mittauspisteen menetelmässä ilmaisinsijoittelussa käytettiin samoja vaihtoehtoja kuin liikennevirtamallissa. Kaikkia tutkittavia tapauksia tarkasteltiin molemmilla ilmaisinsijoittelun vaihtoehdoilla. Ilmaisinsijoittelun vaihtoehtoja on havainnollistettu kuvassa 29.



Kuva 29. Mittauspistesijoittelu. Vaihtoehto 1: ilmaisimet liittymän keskellä ja rampeilla (yläkuva). Vaihtoehto 2: ilmaisimet liittymisrampin jälkeen ja ennen poistumisramppia (alakuva). Linkin keskellä olevaa ilmaisinta käytettiin yhden mittauspisteen menetelmässä.

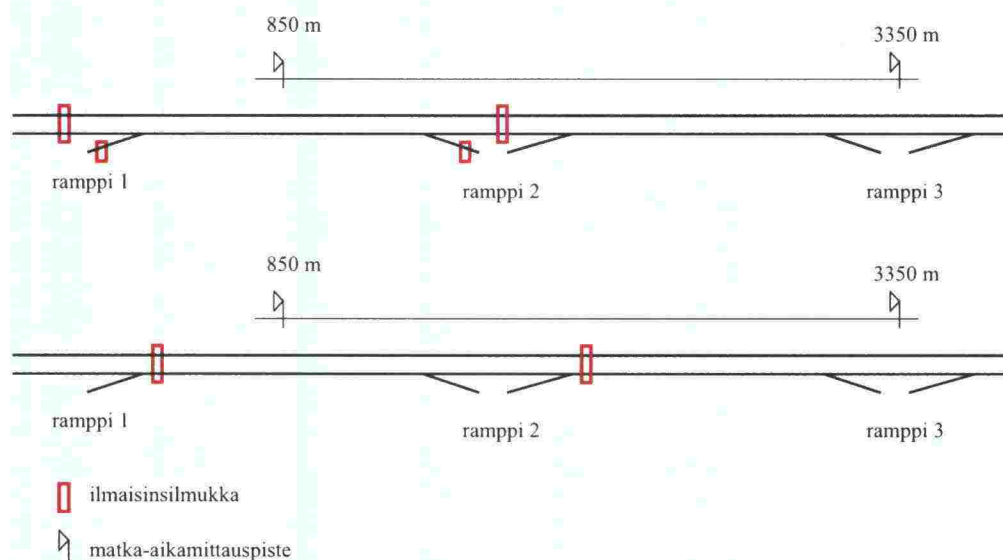
Neuroverkot ja pistenopeusmenetelmät

Neuroverkkoja tarkasteltiin kahdella erilaisella lähtötietoyhdistelmällä (syöteyhdistelmällä). Tarkoituksena oli tarkastella tilannetta, jossa pistemittaus-tietojen lisäksi liikennetilanteen arviointiin on käytettävissä myös matka-aikamittausta, joka ei kuitenkaan ole linkkikohtaista. Molemmissa syöteyhdistelmävaihtoehdoissa lähtötietoina käytettiin sekä liikennemäärä-, nopeus-

TUTKIMUSMENETELMÄ

ja varausastetietoja ilmaisimittain että matka-aikaa mallin ensimmäisen linkin puolesta välistä toisen linkin loppuun.

Lähtötietovaihtoehtoja on havainnollistettu *kuvassa 30*. Ensimmäisessä vaihtoehdossa pistemittauksen ilmaisimet sijaitsivat liittymien keskellä ja rampeilla (vastaa liikennevirtamallin mittauspistesijoittelua 1). Toisessa tapauksessa pistemittauksen ilmaisimet sijaitsivat vain linkin alussa välittömästi liittymisrampin jälkeen. Tarkastelun kohteena olevan linkin matkanopeuden estimointiin käytettiin tällöin kyseisen linkin ja sitä seuraavan linkin alussa mitattuja pistetietoja.



Kuva 30. *Neuroverkoilla käytetyt mittauspistevaihtoehdot. Vaihtoehto 1: ilmaisimet liittymissä ja rampeilla sekä matka-aikamittaus (yläkuva). Vaihtoehto 2: ilmaisimet liittymisramppien jälkeen ja matka-aikamittaus (alakuva).*

Pistenopeuteen perustuvien menetelmien matkanopeusestimaatit laskettiin samaan tapaan, kuin liikennevirtamallin tapauksessa. Toisella neuroverkko-vaihtoehtoon ilmaisinsijoittelulla kahden mittauspisteen menetelmän pistenopeusmittaukset tehtiin samoilla ilmaisimilla, joiden tietoja käytettiin neuroverkon syötteinä.

Neuroverkkotarkasteluissa oli mukana myös liikennevirtamalli. Liikennevirtamallille käytettiin *kuvassa 29* esitettyjä ilmaisinsijoittelun vaihtoehtoja.

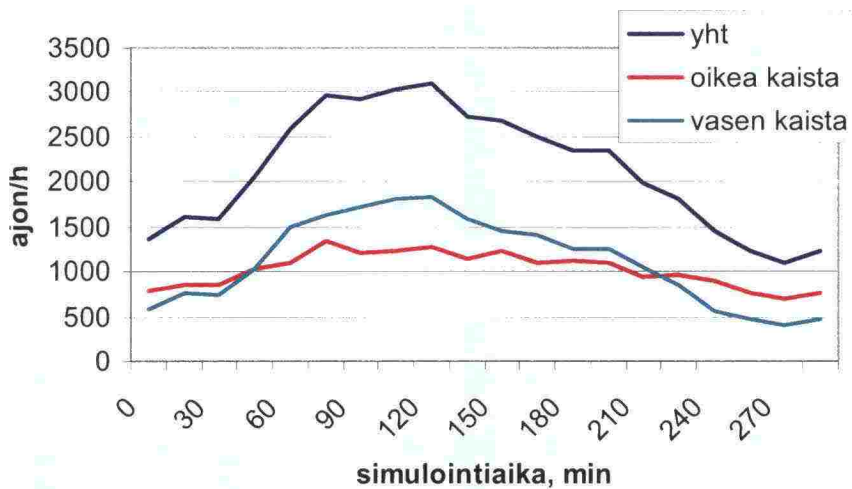
4.7.3 Liikennemäärät ja lähtöpaikka-määräpaikkajakaumat

Linkin matkanopeutta ja sen estimointia tarkasteltiin usealla eri liikennetilanteella. Ensin tarkasteltiin liikennevirtamallia ja pistenopeuteen perustuvien menetelmiä. Tämän jälkeen tarkasteluun otettiin mukaan myös neuroverkot. Neuroverkkojen opetukseen käytettiin kahdeksasta simulointiajasta saatuja tietoja. Neuroverkkojen testaamista varten ajettiin lisäsimulointeja, jotka poikkesivat opetukseen käytetyistä ajoista mm. liikennemäärien ja lähtöpaikka-määräpaikkajakaumien suhteen.

Mallin liikennemäärät muokattiin Tiehallinnon LAM-pistelaskennoista Turunväylällä Friisinmäessä (Turkuun päin). Kaikki simulointiajot liikennevirtamallin ilmaisinvirheiden korjaustapauksia lukuun ottamatta kestivät viisi tuntia.

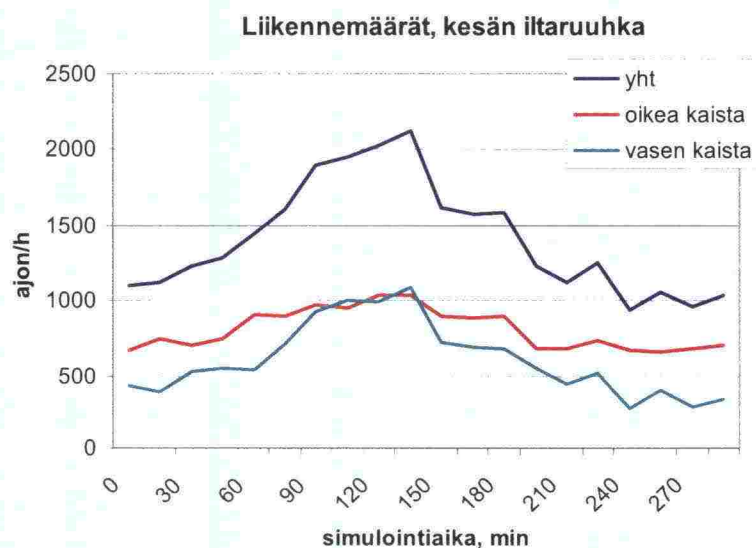
Ruuhkaisen liikenteen liikennemäärät muokattiin Turunväylällä toukokuussa 2003 mitatuista iltaruuhkan liikennemääristä. Hutsim-mallissa pääsuunnalle syötetyt liikennemäärät on esitetty kuvassa 31. Rampeille syötettiin tietty prosentti pääsuunnan liikennemäärästä. Rampin 1 liikennemääränä käytettiin 38 % ja rampin 2 ja 3 liikennemäärinä 31 % pääsuunnan liikennemäärästä. Kaikkien suuntien liikennemäärät muuttuivat simulointiajon aikana samassa suhteessa. Iltaruuhkan liikennemäärästä käytetään nimitystä profiili 1.

Liikennemäärät, iltaruuhka



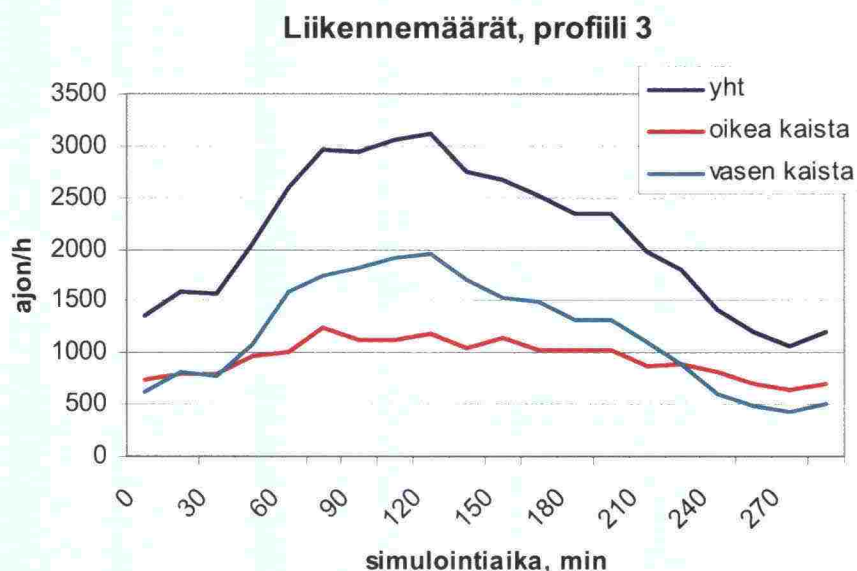
Kuva 31. Iltaruuhkan liikennemäärät pääsuunnalla (profiili 1).

Hiljaisemman liikennetilanteen mallinnukseen käytetyt liikennemäärät muokattiin Turunväylällä heinäkuussa 2003 iltaruuhkan aikana mitatuista liikennemääristä. Pääsuunnalle syötetyt liikennemäärät on esitetty kuvassa 32. Kesäliikenteen iltaruuhkan tapauksessa ramppien liikennemäärä saatiin käyttämällä samoja prosentteja pääsuunnan liikenteestä, kuin profiilin 1 tapauksessa (ramppi 1: 38 %, rampit 2 ja 3: 31 %). Kesäliikenteen iltaruuhkan liikennemäärästä käytetään nimitystä profiili 2.



Kuva 32. Kesäliikenteen iltaruuhkan liikennemäärät pääsuunnalla (profiili 2).

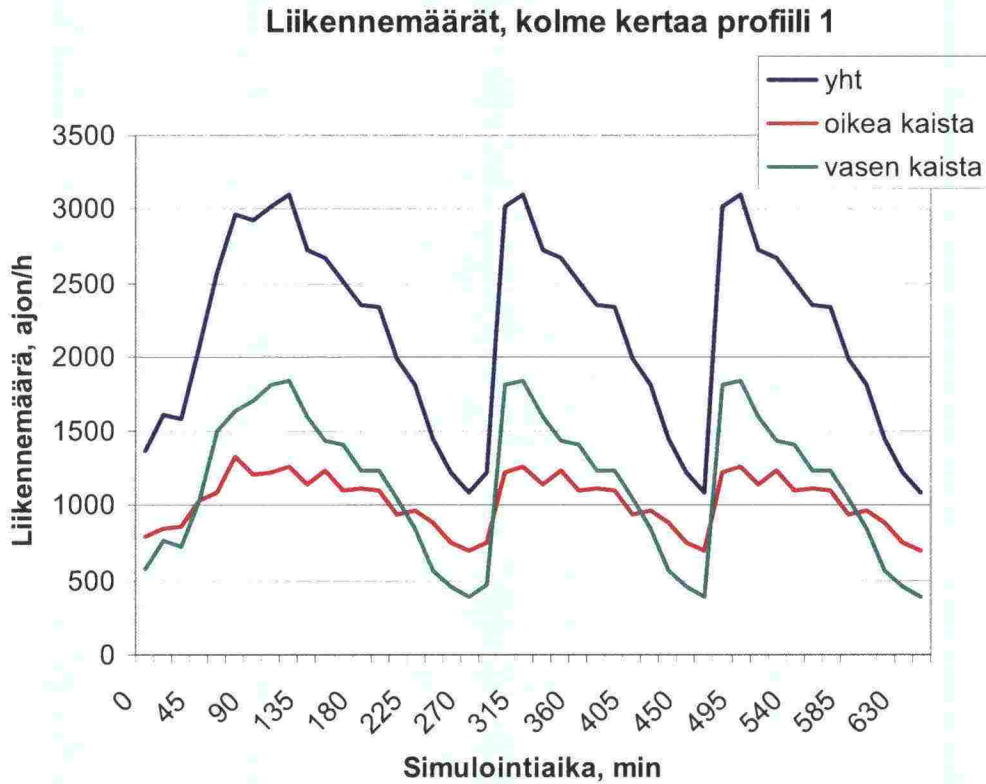
Neuroverkkojen testaamista varten tarvittiin vielä yksi liikennemääräprofiili (profiili 3), jossa liikennemäärät vaihtelevat ajan funktiona. Ramppien liikennemäärinä käytettiin jälleen samoja prosentteja (ramppi 1: 38 %, rampit 2 ja 3: 31 %) pääsuunnan liikenteestä, kuin profiilin 1 tapauksessa. Profiilin 3 pääsuunnan liikennemäärät on esitetty kuvassa 33.



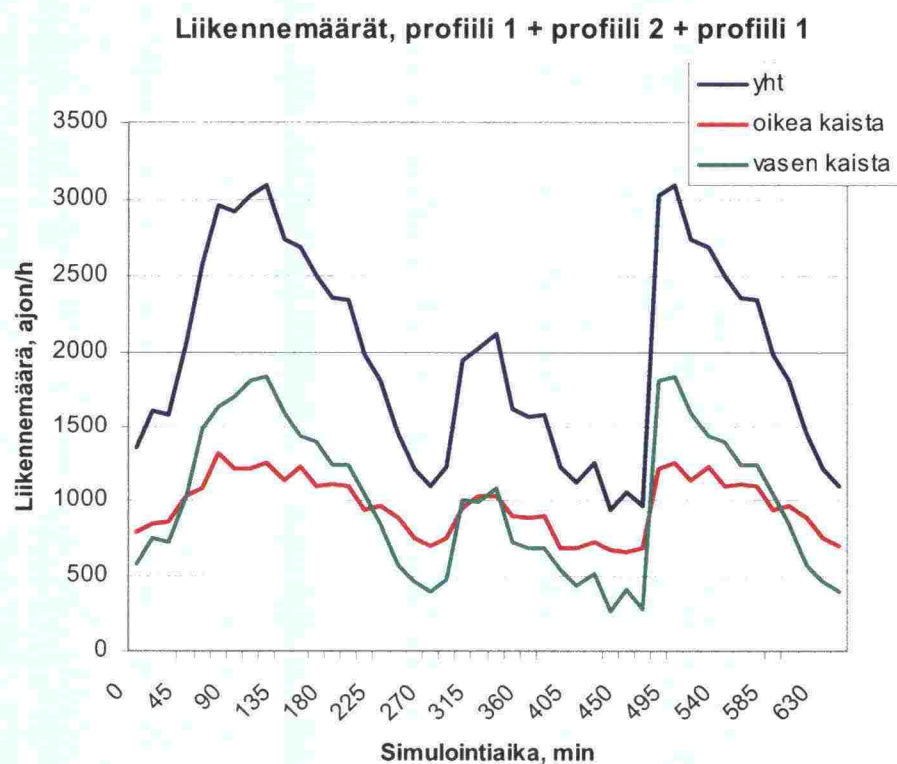
Kuva 33. Profiilin 3 liikennemäärät pääsuunnalla.

Liikennevirtamalliin kertyvän virheen poistamista tutkittiin kahdella 11 tunnin (5 h + 3 h + 3 h) simulointiajolla, joiden liikennemäärät saatiin yhdistämällä osia useammasta edellä mainitusta liikennemääräprofiilista. Ensimmäisessä tapauksessa malliin syötettävät liikennemäärät saatiin käyttämällä iltaruuh-

kan (profiili 1) liikennemääriä kolme kertaa peräkkäin. Toisessa tapauksessa yhdistettiin iltaruuhkan ja kesäliikenteen iltaruuhkan liikennemääräprofiilit (profiili 1 + profiili 2 + profiili 1). Pääsuunnan liikennemäärät näissä tapauksissa on esitetty kuvissa 34 ja 35. Lisäksi liikennevirtamallin virheen korjaamistekniikoita testattiin yhdessä häiriötilanteessa (häiriön paikka ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia).



Kuva 34. Ensimmäisessä ilmaisinvirheen korjaustapauksessa käytetyt pääsuunnan liikennemäärät.



Kuva 35. Toisessa ilmaisinvirheen korjaustapauksessa käytetyt pääsuunnan liikennemäärät.

Koko simulointiajon ajan vakiona pysyviä liikennemääriä käytettiin tilanteissa, joissa tutkittiin

1. rampilta 1 tulevan liikenteen vaihtelua (muiden suuntien liikennemäärä pysyi vakiona)
2. rampille 2 poistuvan liikenteen vaihtelua
3. häiriön vaikutusta sujuvuusestimaatteihin
4. rampilta tulevan liikenteen vaihtelua, versio 2 (neuroverkkojen testitapaus)

Liikennemäärät vakioliikennemäärien tapauksissa on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Koko simulointiajon ajan vakiona pysyvät liikennemäärät. 1: rampilta 1 tulevan liikennemäärän vaihtelu, 2: rampille 2 poistuvan liikennemäärän vaihtelu, 3: häiriötilanteet, 4: rampilta tulevan liikennemäärän vaihtelu, versio 2 (neuroverkkojen testitapaus).

vakio 1

	ajon/h
oikea kaista	1600
vasen kaista	1000
ramppi 1	130
ramppi 2	400
ramppi 3	400

vakio 2

	ajon/h
oikea kaista	1800
vasen kaista	1000
ramppi 1	800
ramppi 2	800
ramppi 3	800

vakio 3

	ajon/h
oikea kaista	1020
vasen kaista	685
ramppi 1	85
ramppi 2	200
ramppi 3	200

vakio 4

	ajon/h
oikea kaista	1700
vasen kaista	900
ramppi 1	260
ramppi 2	500
ramppi 3	500

Häiriötä liikennevirtaan aiheutuu usein liittymien kohdilla, kun rampilta tulevat ajoneuvot liittyvät pääsuunnan liikennevirtaan. Rampilta tulevan liikenteen osuuden vaihtelun vaikutusta todelliseen matkanopeuteen ja eri nopeus-tilaattihin tutkittiin tilanteessa, jossa rampilta 1 tulevan liikenteen osuus vaihtelee simuloinnin aikana ollen 5–60 % pääsuunnan liikennemäärästä.

Rampille poistuva liikenne voi aiheuttaa häiriötä pääsuunnan liikennevirtaan, jos ramppi on geometrialtaan tiukka, kuten testimallissa oli. Rampille poistuvan liikenteen osuuden vaihtelun vaikutusta tutkittiin tilanteessa, jossa rampille 2 poistuvan liikenteen osuus vaihteli ollen 5–50 % pääsuunnan liikennemäärästä.

Häiriötilanteissa häiriön sijainti ja kesto vaihteli, mutta liikennemäärä pidettiin kaikissa tapauksissa vakiona. Häiriötilanteissa haluttiin tarkastella, miten häiriön sijainti suhteessa ilmaisimiin ja sen kesto vaikuttaa häiriön havaitsemisnopeuteen eri menetelmillä ja pystyvätkö menetelmät estimoimaan sujuvuuden laskun oikein.

Simulointiajoissa käytetyt lähtöpaikka-määräpaikkajakaumat on esitetty taulukossa 8. Lähtöpaikka-määräpaikkamatriiseja 1 ja 2 käytettiin simulointiajoissa, joissa tutkittiin liikennevirtamallia ja pistenopeusmenetelmiä. Matriiseja 3 ja 4 käytettiin neuroverkkojen testitapauksissa.

TUTKIMUSMENETELMÄ

Taulukko 8. Simulointitutkimuksessa käytetyt lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit.

1: %	määräpaikka			
lähtöpaikka	pääsuunta	ramppi 1	ramppi 2	ramppi 3
pääsuunta	70	-	15	15
ramppi 1	80	-	5	15
ramppi 2	95	-	-	5
ramppi 3	100	-	-	-

2: %	määräpaikka			
lähtöpaikka	pääsuunta	ramppi 1	ramppi 2	ramppi 3
pääsuunta	60	-	20	20
ramppi 1	80	-	0	20
ramppi 2	90	-	-	10
ramppi 3	100	-	-	-

2*: %	määräpaikka			
lähtöpaikka	pääsuunta	ramppi 1	ramppi 2	ramppi 3
pääsuunta	75	-	5	20
ramppi 1	80	-	0	20
ramppi 2	90	-	-	10
ramppi 3	100	-	-	-

3: %	määräpaikka			
lähtöpaikka	pääsuunta	ramppi 1	ramppi 2	ramppi 3
pääsuunta	60	-	20	20
ramppi 1	70	-	10	20
ramppi 2	90	-	-	10
ramppi 3	100	-	-	-

4: %	määräpaikka			
lähtöpaikka	pääsuunta	ramppi 1	ramppi 2	ramppi 3
pääsuunta	60	-	30	10
ramppi 1	80	-	10	10
ramppi 2	90	-	-	10
ramppi 3	100	-	-	-

= vaihtelee 5 prosenttiyksikön portaita 15 min välein

4.7.4 Simulointikokeessa tutkittavat tapaukset

Liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien testaamiseen käytetyt tapaukset ja niiden liikennemäärät sekä lähtöpaikka-määräpaikkamatriisit on esitetty taulukossa 9. Neuroverkkojen toimintaa tarkasteltiin tapauksilla, jotka on esitetty taulukossa 1210. Neuroverkkojen opetuksessa käytetyt tapaukset on esitetty taulukossa 12. Neuroverkkojen opetus- ja testitapauksissa hyödynnettiin osittain samoja tapauksia, joita käytettiin liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien testaamisessa.

Taulukko 9. Liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien testaamiseen käytetyt tapaukset

Tapaus	Liikennemäärä	Lähtöpaikka-määräpaikkamatriisi
Iltaruuhka	profiili 1	1
Kesäliikenteen iltaruuhka	profiili 2	1
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu	vakio 1	2
Rampille poistuvan liikenteen vaihtelu	vakio 2	2*
Häiriö linkillä keskellä olevan ilmaisimen jälkeen, 45 min tai 2 h	vakio 3	2
Häiriö ennen linkin keskellä olevaa ilmaisinta, 45 min tai 2 h	vakio 3	2
Häiriö linkin aloittavassa liittymässä, 45 min	vakio 3	2
Häiriö linkin päättävässä liittymässä, 45 min	vakio 3	2
Iltaruuhka, liikennetiheyden alkuarvossa virhe	profiili 1	1
Iltaruuhka, liikennetiheys arvioitu ilmaisimien varausasteiden perusteella	profiili 1	1
Iltaruuhka, linkin alussa ja lopussa olevissa ilmaisimissa sama virhe%	profiili 1	1
Iltaruuhka, linkin alussa suurempi virhe% kuin linkin lopussa	profiili 1	1
Iltaruuhka, pitkä linkki	profiili 1	1
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu, pitkä linkki	vakio 1	2
Häiriö linkillä keskellä olevan ilmaisimen jälkeen, 45 min, pitkä linkki	vakio 3	2
Häiriö linkillä ennen linkin keskellä olevaa ilmaisinta, 45 min, pitkä linkki	vakio 3	2
Kolme ruuhkahuippua peräkkäin, tapaus 1 (liikennetiheysarvion korjaus)	3 x prof 1	1
Kolme ruuhkahuippua peräkkäin, tapaus 2 (liikennetiheysarvion korjaus)	prof 1, prof 2, prof 1	1
Häiriö ennen linkin keskellä olevaa ilmaisinta, 2 h (liikennetiheysarvion korjaus)	vakio 3	2

* rampille 2 pääsuunnalta poistuvan liikenteen osuus vaihtelee

Taulukko 10. Neuroverkkomenetelmien testaamiseen käytetyt tapaukset.

Tapaus	Liikennemäärä	Lähtöpaikka- määräpaikka- matriisi
Ilta ruuhka 2	profiili 3	3
Kesäliikenteen ilta ruuhka 2	profiili 2	4
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu 2	vakio 4	2
Häiriö ennen linkin keskellä olevaa matka-aikamittauspistettä, 45 min	vakio 3	2
Häiriö linkillä keskellä olevan matka-aikamittauspisteen jälkeen, 2 h	vakio 3	2
Häiriö linkin aloittavassa liittymässä, 45 min	vakio 3	2
Häiriö linkin päättävässä liittymässä, 45 min	vakio 3	2
Toiselta rampilta tulevan liikenteen vaihtelu 2	vakio 4	2
Ilta ruuhka 2, kaikissa ilmaisimissa sama virhe%	profiili 3	3

Taulukko 11. Neuroverkkomenetelmien opetukseen käytetyt tapaukset.

Neuroverkkojen opetustapaukset	Liikennemäärä	Lähtöpaikka- määräpaikka- matriisi
Ilta ruuhka	profiili 1	1
Kesäliikenteen ilta ruuhka	profiili 2	1
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu	vakio 1	2
Rampille poistuvan liikenteen vaihtelu	vakio 2	2*
Häiriö linkillä keskellä olevan matka-aikamittauspisteen jälkeen, 45 min	vakio 3	2
Häiriö ennen linkin keskellä olevaa matka-aikamittauspistettä, 2 h	vakio 3	2
Häiriö toisella linkillä, kesto 45 min	vakio 3	2
Toiselta rampilta tulevan liikenteen vaihtelu	vakio 1	2

* rampille 2 pääsuunnalta poistuvan liikenteen osuus vaihtelee

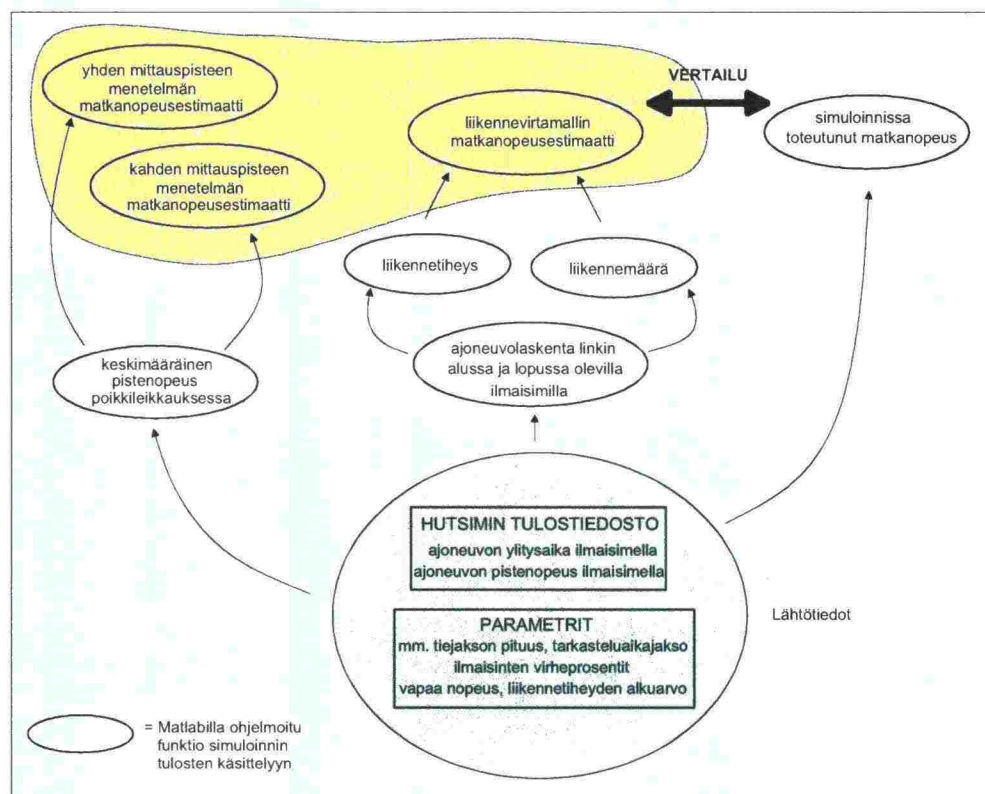
4.8 Liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien toteutus

Liikennevirtamallin tarkasteluissa matkanopeusestimaatit laskettiin lyhyellä linkillä 30 s aikajaksoissa (pidemmällä linkillä käytettiin myös 60 s tarkasteluajakaksoa). Pistenopeusmenetelmissä matkanopeuden laskentaan ajanhetkellä t käytettiin edellisen 30 s:n aikana mitattuja pistenopeuskeskiarvoja ja liikennevirtamallilla edellisen 30 s:n aikana linkin alussa ja lopussa havaittuja ajoneuvomääriä. Myös simuloinnissa toteutunutta matka-aikaa päivitettiin 30 s:n välein.

Liikennemäärän vaihtelut tarkastelujaksosta toiseen voivat aiheuttaa sen, että liikennevirtamallin nopeusestimaatti saa epärealistisen suuria arvoja. Liikennevirtamallin nopeusestimaatti rajoitettiin tämän takia nopeusrajoituksen mukaiseen 100 km/h.

Sekä liikennevirtamalliin että pistenopeuteen perustuvien menetelmien tarvitsemat laskelmat toteutettiin Matlab-ohjelmistolla. Lähtötiedot luettiin Hutsimin tuottamasta ajoneuvokohtaisesta tulostiedostosta.

Matkanopeusestimaattien laskentaa varten tarvitaan joukko parametreja, kuten tiejakson pituus, vapaa nopeus, laskentavälin pituus, ilmaisinten virheprosentit, liikennetiheyden alkuarvo jne. Liikennevirtamallin ja pistenopeuteen perustuvien menetelmien matkanopeusestimaattien laskenta toteutettiin ohjelmoimalla tarvittavat funktiot Matlabin omalla ohjelmointikielellä. Laskennan vaiheita on havainnollistettu kuvassa 36.



Kuva 36. Liikennevirtamallin ja pistenopeuteen perustuvien menetelmien lähtötiedot saatiin Hutsimin tulostiedostosta (delay-tiedosto) sekä parametreistä.

4.9 Liikennevirtamalliin kumuloituvan virheen korjaaminen

4.9.1 Ehdot korjauksen toteuttamiseen

Liikennevirtamallissa liikennetiheyden laskenta perustuu liikennetiheyden arvoon edellisellä ajanhetkellä. Jos liikennetiheyden arvo jollain ajanhetkellä on virheellinen, virhe näkyy estimaatissa koko laskennan ajan. Luvussa 3.2 todettiin, että jos ilmaisimet jättivät osan ajoneuvoista havaitsematta, liikennevirtamallin liikennetiheydestimaattiin ja sitä kautta matkanopeusestimaattiin kumuloituu virhettä, joka voi kasvaa koko ajan suuremmaksi. Virheen vaikutusta voidaan vähentää aloittamalla laskenta alusta mahdollisimman usein, mutta laskentaan tarvitaan aina liikennetiheyden alkuarvo.

Kirjallisuustutkimuksessa havaittiin, että ilmaisinvirheiden vaikutusta on yritetty korjata käyttämällä Kalman-suodinta (Holma 1991) ja sumeaa logiikkaa sekä neuroverkkoja (Manstetten ja Maichle 1996). Luvussa 2.2.1 todettiin, että nykyisellä tekniikalla toteutetut LAM-pisteet jättivät havaitsematta alle prosentin ajoneuvoista.

Tässä työssä ilmaisinvirheiden vaikutuksen korjaamiseen valittiin kaksi tekniikkaa. Molemmissa tekniikoissa liikennetiheyttä arvioidaan jatkuvuusyhtä-

lön lisäksi ilmaisimen varausasteen perusteella. Varausasteen perusteella laskettua liikennetiheyttä voidaan käyttää paikallisen liikennetiheyden estimaattina, ja arviona linkin liikennetiheydestä käytettiin simulointitutkimuksessa linkin alussa ja lopussa mitattujen varausasteiden keskiarvoa. Liikennetiheyskorjaus käynnistetään, jos jatkuvuusyhtälön antama liikennetiheys eroaa tarpeeksi paljon ilmaisimen varausasteen perusteella lasketusta liikennetiheydestä ja tietyt korjaukselle asetetut ehdot täyttyvät.

Liikennetiheyskorjaus pyritään tekemään tilanteessa, jossa liikennetilanne linkillä on vapaa. Molemmissa menetelmissä etsitään hetkeä, jolloin liikennetilanne näyttää pistemittaustietojen perusteella vapaalta. Ehdot vapaalle liikennetilanteelle asetettiin seuraavasti:

- ilmaisinten varausaste sekä linkin alussa että lopussa on alle 0,13 (vastasi mallissa liikennetiheyttä n. 13 ajon/km),
- pistenopeus sekä linkin alussa ja että lopussa on yli 94 km/h.

Näiden ehtojen lisäksi jatkuvuusyhtälön antaman liikennetiheysarvion ja ilmaisimen varausasteen perusteella tehdyn liikennetiheysarvion eron on oltava yli 4 ajon/km. Ehtojen toteutuessa on todennäköistä, että liikennetilanne on vapaa. Tällöin jatkuvuusyhtälön antaman liikennetiheydestimaatin ja ilmaisimen varausasteen perusteella lasketun liikennetiheyden ero johtuu todennäköisesti siitä, että jatkuvuusyhtälöön on kertynyt virhettä.

4.9.2 Korjaus varausasteen perusteella laskettuun liikennetiheyteen

Edellä esitettyjen ehtojen täytyessä ilmaisimen varausasteen perusteella laskettu liikennetiheys on todennäköisesti lähempänä linkin todellista liikennetiheyttä kuin jatkuvuusyhtälön antama tiheydestimaatti. Ehtojen täytyessä ensimmäisessä liikennetiheyden korjausmenetelmässä jatkuvuusyhtälön liikennetiheyslaskenta aloitetaan alusta asettamalla liikennetiheyden alkuarvoksi ilmaisimen varausasteen perusteella laskettu liikennetiheys.

Varausasteen perusteella arvioitu liikennetiheys lasketaan linkin alun ja lopun ilmaisinten varausasteiden keskiarvon perusteella.

$$k_{occ} = \frac{o}{d + g}$$

- | | | |
|-------|-----|--|
| missä | o | linkin alussa ja lopussa mitattujen varausasteiden keskiarvo |
| | d | ilmaisimen pituus |
| | g | keskimääräinen ajoneuvopituus |

4.9.3 Korjaus vapaan virran matka-aikana havaittujen ajoneuvojen perusteella

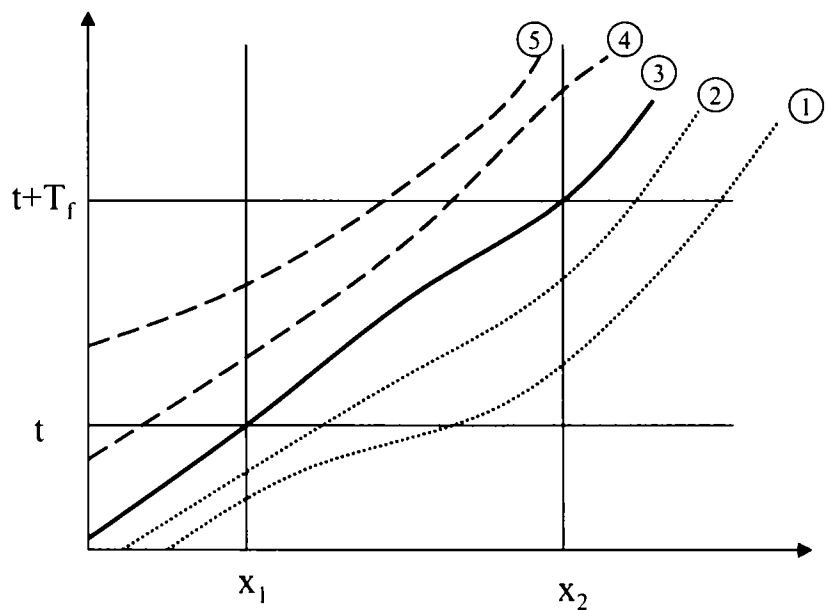
Edellä esitettyjen ehtojen täytyessä ajoneuvojen matka-aika linkillä on todennäköisesti lähellä vapaan liikennevirran matka-aikaa. Ehtojen täytyessä

TUTKIMUSMENETELMÄ

toisessa liikennetiheyden korjausmenetelmässä jatkuvuusyhtälön liikennetiheyslaskenta aloitetaan alusta käyttämällä liikennetiheyden alkuarvona vapaan virran matka-ajan T_f aikana havaittujen ajoneuvojen avulla laskettua liikennetiheyttä. Vapaan virran matka-aika T_f lasketaan kussakin tilanteessa käyttämällä matkanopeuden arvona linkin alussa ja lopussa mitattujen pistenopeuksien keskiarvoa.

Korjausmenetelmässä ajoneuvojen ilmaisuista ikään kuin valitaan yksi referenssiajoneuvo, jonka matka-ajan oletetaan olevan vapaan virran matka-aika. Tämän ajan T_f kuluttua referenssiajoneuvon (ja sen edellä ajaneiden ajoneuvojen) voidaan olettaa poistuneen linkiltä, ja linkillä sillä hetkellä olevien ajoneuvojen lukumäärä on linkin alussa matka-ajan T_f aikana havaittujen ajoneuvojen lukumäärä.

Liikennetiheyden alkuarvon määrittämistä toisessa korjausmenetelmässä on havainnollistettu kuvassa 37. Ajoneuvo numero 3 on referenssiajoneuvo. Laskenta aloitetaan, kun referenssiajoneuvo on linkin alussa poikkileikkauksessa x_1 olevan ilmaisimen kohdalla. Laskentajakson pituus on vapaan liikennevirran matka-ajan pituus T_f . Laskentajakson lopussa referenssiajoneuvon edellä kulkeneet ajoneuvot (esimerkissä 1 ja 2) ovat poistuneet linkiltä. Laskentajakson lopussa linkillä ovat ajoneuvot, jotka on havaittu linkin alussa laskentajakson aikana (esimerkissä ajoneuvot 4 ja 5).

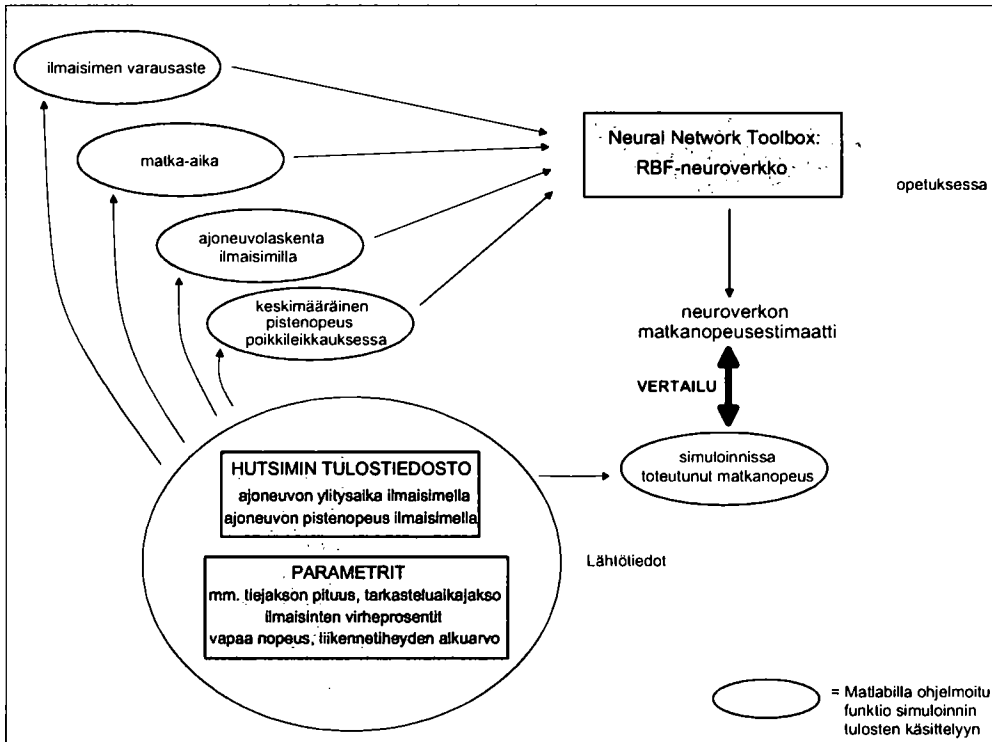


Kuva 37. Liikennetiheyden alkuarvo määrittäminen käyttämällä vapaan virran matka-ajan aikana linkin alussa havaittujen ajoneuvojen määrää.

4.10 Neuroverkkojen opetus

Neuroverkot toteutettiin Matlabin Neural Network Toolboxilla. Omien, Matlabin ohjelmointikielellä toteutettujen funktioiden avulla muodostettiin neuroverkon opetusprosessin syötematriisi ja haluttu vastevektori. Lähtötiedon laskemisen apuna käytettiin jo liikennevirtamallin ja pistenopeuteen perustu-

vien menetelmien yhteydessä ohjelmoituja funktioita. Neuroverkkojen syötteitä on havainnollistettu kuvassa 38.



Kuva 38. Matlabilla toteutettujen funktioiden avulla lasketaan neuroverkolle annettavat syötteet. Neuroverkko palauttaa matkanopeusestimaatin.

Koska neuroverkolle syötettävät lähtöarvot ovat numeroarvoiltaan hyvin erilaisia, on syöteaineisto hyvä skaalata tai normeerata ennen opetusta (Innmaa ja Pursula 2000). Syötetiedot skaalattiin niin, että niiden kaikkien vaihteluväli oli $[0,1]$.

Estimaatin päivitysvälinä käytettiin kahta minuuttia. Koska lähtötietoja ei ta-soitettu, päivitysväliksi valittiin aika, joka on tarpeeksi pitkä tasaamaan satunnaisvaihtelusta johtuvaa kohinaa. Päivitysväli ei kuitenkaan saa olla liian pitkä, jotta liikennetilanteesta saadaan ajantasainen arvio.

Neuroverkolle annettiin syötetietoina kunkin kahden minuutin laskentajakson liikennemäärä, keskimääräinen pistenopeus ja varausaste ilmaisimittain sekä kaksi linkkiä osittain kattava matka-aikamittaus. Opetuksessa neuroverkko syötettiin myös jokaista kahden minuutin jaksoa eli jokaista opetus-pistettä vastaava simulointimallissa toteutunut matkanopeus. Neuroverkkoa käytettäessä syötetietona verkko annetaan opetusdataa vastaavat syötetiedot ja neuroverkko palauttaa tuloksena estimoidun matkanopeuden.

Neuroverkkojen opetukseen käytettiin kahdeksasta eri simulointiajasta saatuja tuloksia. Neuroverkon opetusvaiheen syötematriisiin koko oli ensimmäisellä syötevaihtoehdolla 19×1200 ja toisella syötevaihtoehdolla 13×1200 . Matriisin sarakkeiden (eli opetuspisteiden) lukumäärä 1200 tulee kahdeksan viiden tunnin simulointiajon yhteensä sisältämien kahden minuutin jaksojen lukumäärästä. Matriisin rivien lukumäärä on syöteparametrien lukumäärä

SIMULOINTITULOKSET

(ensimmäisessä syötevaihtoehdossa 6 ilmaisinsilmukkaa \times 3 pistemittaustietoa + matka-aikamittaus ja toisessa syötevaihtoehdossa 4 ilmaisinsilmukkaa \times 3 pistemittaustietoa + matka-aikamittaus).

Piilokerroksen neuronien lukumääräksi asetettiin 50. Estimoitavien parametrien lukumäärän suositeltavana ylärajana voidaan pitää kymmenesosaa syötedatan määrästä (Innamaa ja Pursula 2000). RBF-neuroverkon tapauksessa tämä vastaa samalla piilokerroksen neuronien lukumäärää, koska estimoitavat parametrit ovat neuronien painokertoimet.

Ensimmäisellä syötevaihtoehdolla neuroverkon neliövirheiden summa opetusprosessin jälkeen oli noin 40620, mikä tarkoittaa jokaisen kahden minuutin estimaatin keskimääräisen virheen olevan noin 5,8 km/h. Toisella syötevaihtoehdolla neuroverkon neliövirheiden summa oli vain 8280, mikä tarkoittaa keskimääräisenä virheenä noin 2,6 km/h.

5 SIMULOINTITULOKSET

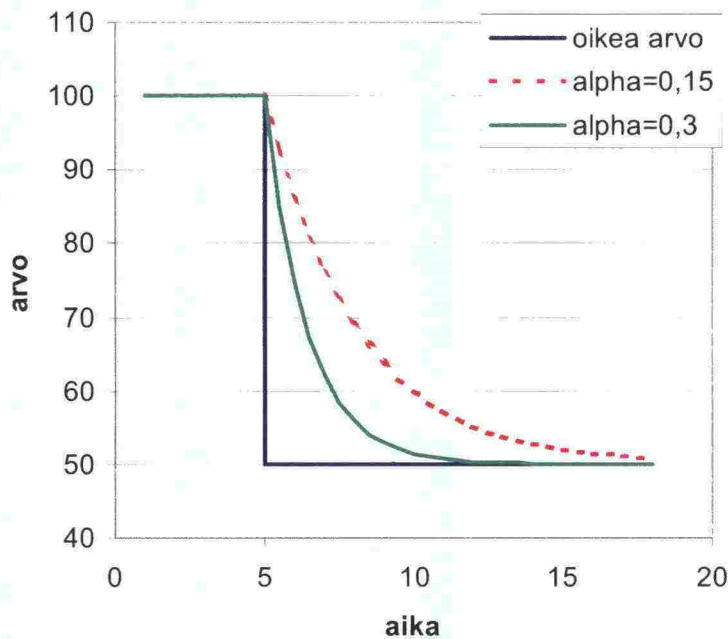
5.1 Tulosten käsittely

Estimoitua ja simuloinnissa toteutunutta matkanopeutta suodatettiin, koska sekä havainnot että erityisesti liikennevirtamallin antama matkanopeusestimaatti sisälsivät varsin paljon satunnaisvaihtelusta johtuvaa kohinaa. Suodattukseen käytettiin eksponentiaalista tasoitusta, missä uutta havaintoa painotetaan kertoimella $\alpha \in [0, 1]$ ja vanhaa tulosta vastaavasti kertoimella $(1-\alpha)$.

$$X_t = (1 - \alpha)X_{t-\Delta t} + \alpha Y_t$$

missä	X_t	tasoitettu arvo ajanhetkellä t
	$X_{t-\Delta t}$	tasoitettu arvo ajanhetkellä $t-\Delta t$
	Y_t	uusi havainto ajanhetkellä t
	α	parametri, joka määrittää uuden havainnon painoarvon, $\alpha \in [0, 1]$

Mitä pienempi paino uudelle havainnolle annetaan, sitä hitaammin malli reagoi muutoksiin, mutta myös kohina vaimenee tehokkaammin. Kuvassa 39 on esimerkki siitä, miten eksponentiaalisesti tasoitettut arvot käyttäytyvät eri α :n arviolla. Matkanopeusestimaattien laskennassa liikennevirtamallilla ja pistenopeusmenetelmillä käytettiin arvoa $\alpha = 0,15$ ja todellisen matkanopeuden määrittämiseen arvoa $\alpha = 0,3$. Neuroverkkojen tulosten tasoitamiseen käytettiin arvoa $\alpha = 0,3$ tai $\alpha = 0,4$. Arvot valittiin siten, että kohina tuloksissa vaimenee, mutta mallit eivät muutu liian hitaiksi.



Kuva 39. Ekspontiaalinen tasoitus arvoilla $\alpha=0,15$ ja $\alpha=0,3$.

5.2 Liikennevirtamallin simulointitulokset

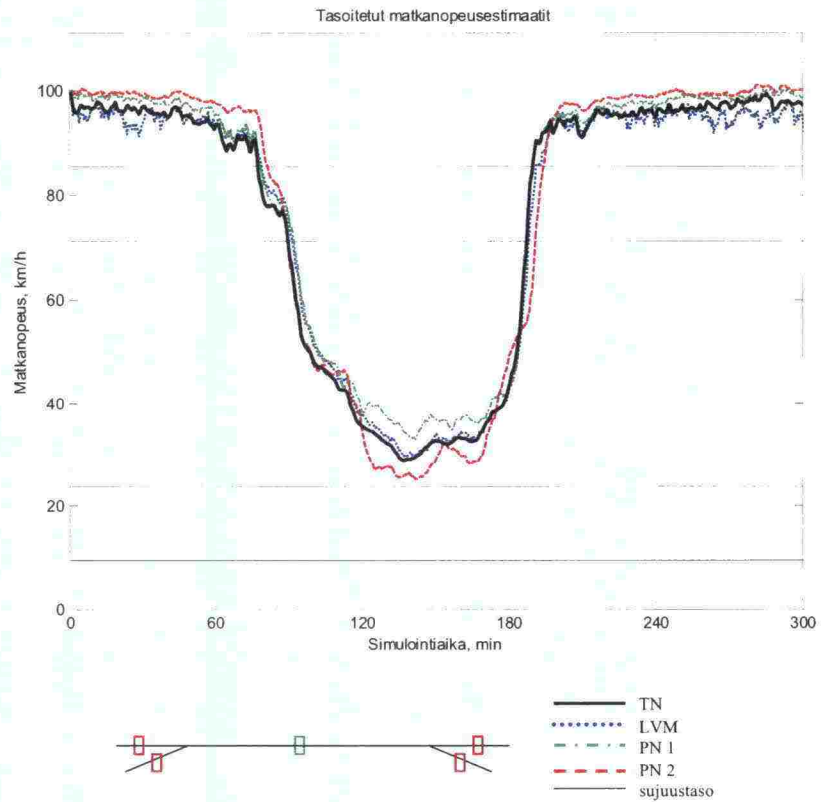
5.2.1 Liikennemäärän muutoksen vaikutus

Iltaruuhka

Iltaruuhkan simulointiajossa ruuhkaa muodostui lähinnä liittymien kohdalle, kun rampilta tuleva ja rampille poistuva liikenne aiheutti paikallisia häiriötä pääsuunnan liikennevirtaan. Kuvassa 40 on esitetty matkanopeus iltaruuhkan aikana ilmaisinsijoittelulla 1. Kuvasta nähdään, että liikennevirtamallin estimaatti matkanopeudelle on varsin hyvä. Myös pistenopeusmenetelmät pärjäävät kohtuullisen hyvin, koska nopeustaso linkillä on ollut varsin homogeeninen. Yhden mittauspisteen menetelmä kuitenkin yliarvioi matkanopeutta, koska linkin keskellä liikenne on sujuvampaa kuin liittymissä. Kahden mittauspisteen menetelmä puolestaan aliarvioi matkanopeutta, koska nopeustaso liittymissä on linkin keskimääräistä nopeustasoa alempi.

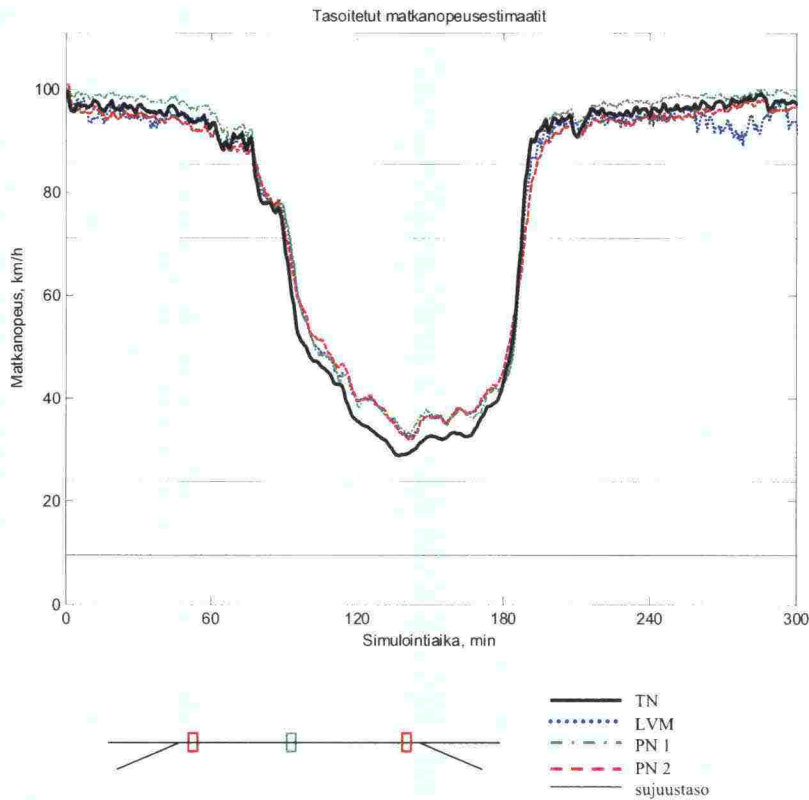
Kuvassa 40 nähdään myös, että liikennevirtamalli estimoi matkanopeuden parhaiten juuri ruuhkan aikana. Hiljaisemmalla liikenteellä simuloinnin alussa ja lopussa mallin antamassa estimaatissa esiintyy paljon enemmän satunnaisvaihtelusta johtuvaa kohinaa. Hiljaisemmalla liikenteellä 30 s aikajaksoissa havaittujen ajoneuvojen lukumäärän hajonta on suurempi kuin ruuhkaliikenteessä. Tämä johtaa suurempiin vaihteluihin liikennetiheys- ja liikennemääräestimaateissa ja sitä kautta suurempiin vaihteluihin myös matkanopeusestimaatissa.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 40. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkan aikana (ilmaisinsijoittelu 1).

Kuva 41 esittää liikennevirtamallilla ja pistenopeusmenetelmillä estimoituja ja simuloinnissa toteutunutta matkanopeutta iltaruuhkassa ilmaisinsijoittelulla 2. Nyt liikennevirtamallin estimoima nopeus on ruuhkassa todellista nopeutta suurempi. Myös kahden mittauspisteen menetelmä antaa todellista suuremman matkanopeuden. Tämä johtuu siitä, että ilmaisinsijoittelulla 2 liittymien liikennetilanne jää huomioimatta. Kun liittymät ovat erityisen ruuhkautuneet ja muun linkin liikennetilanne on homogeeninen, ovat kaikkien mallien antamat nopeusestimaatit lähellä toisiaan.

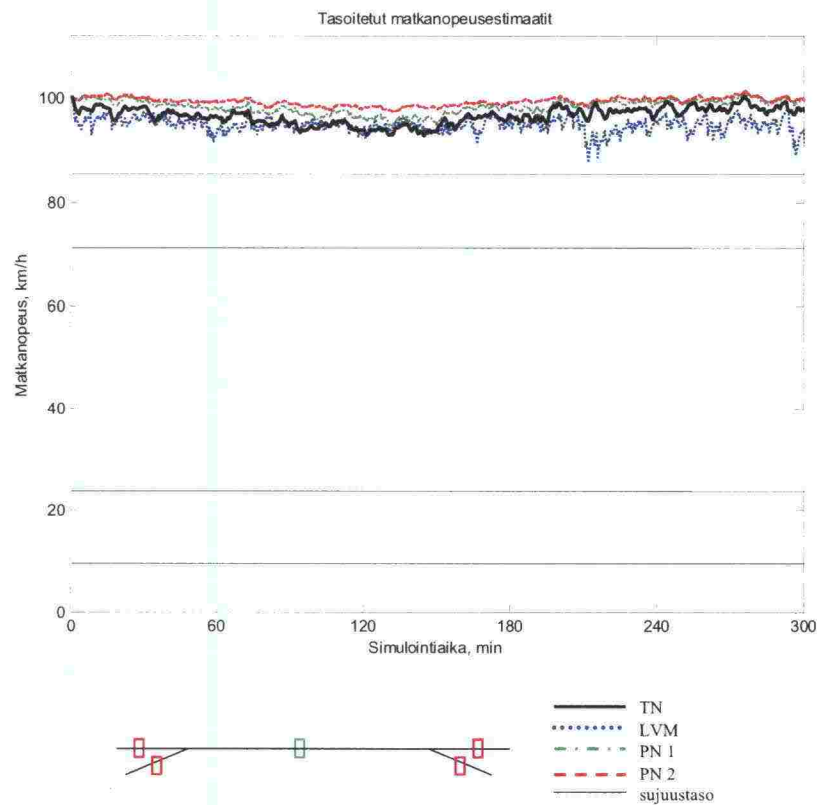


Kuva 41. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkan aikana (ilmaisinsijoittelu 2).

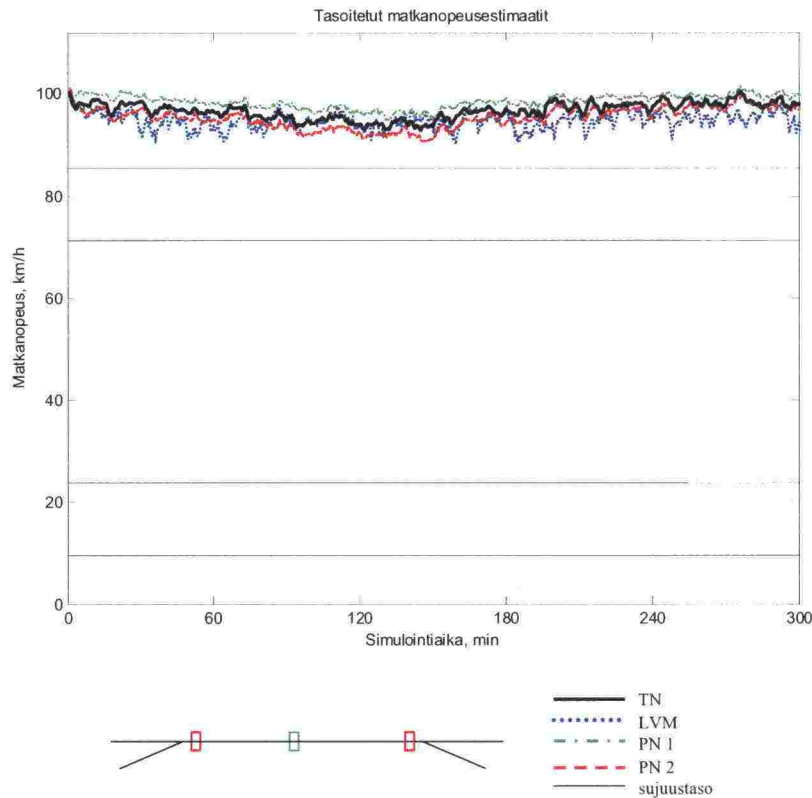
Kesäliikenteen iltaruuhka

Kesän iltaruuhkassa liikennemäärä oli niin alhainen, ettei matkanopeus samentavasti alentunut (kuvat 42 ja 43). Nopeustaso linkillä oli yhtenäinen, joten pistenopeuteen perustuvat menetelmät antavat hyvän tuloksen. Nopeustaso on ollut liittymissä korkeampi kuin juuri ennen poistumisrampia ja/tai liittymisrampin jälkeen, mikä nähdään siinä, että ilmaisinsijoittelulla 1 kahden mittauspisteen menetelmä antaa suuremman nopeuden kuin ilmaisinsijoittelulla 2. Liikennevirtamallin tuloksessa on pistenopeusmalleja enemmän kohinaa. Nytkin huomataan, että liikennevirtamallin tulos on tarkimmillaan vilkkaimman liikenteen aikana.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 42. Matkanopeusestimaatit kesäliikenteen iltaruuhkan aikana (ilmaisinsijoittelu 1).

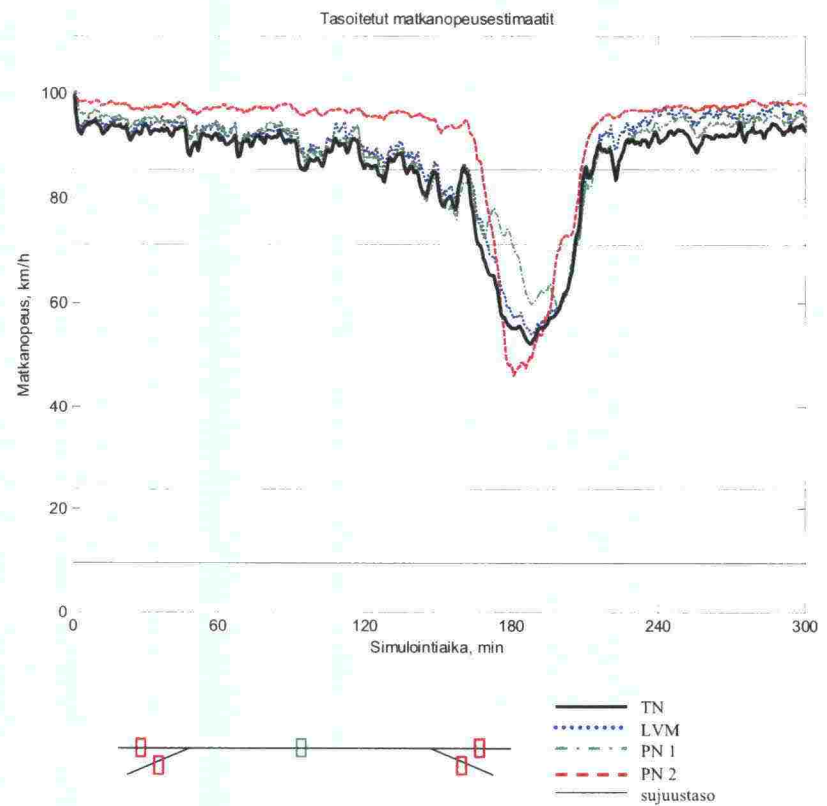


Kuva 43. Matkanopeusestimaatit kesäliikenteen iltaruuhkan aikana (ilmaisinsijoittelu 2).

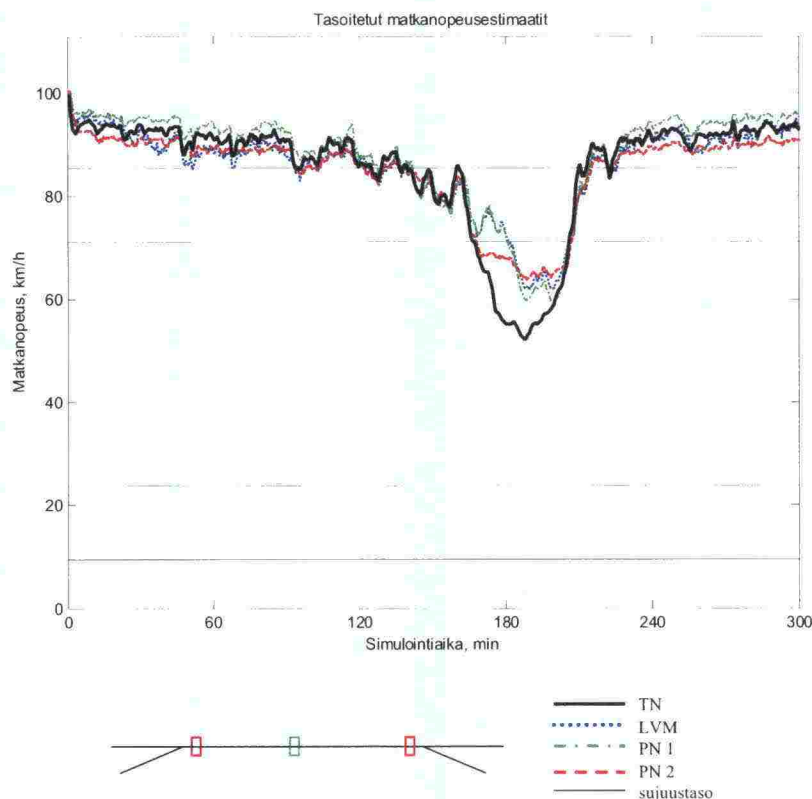
Rampilta tulevan liikennemäärän vaihtelu

Seuraavaksi tutkittiin liikennetilannetta, jossa mallin ensimmäiseltä rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee. Kun rampin liikennemäärä kasvaa, liittyvä liikenne aiheuttaa häiriöitä pääsuunnan liikennevirtaan. Kuva 44 esittää matkanopeusestimaattien käyttäytymisen, kun käytetään ilmaisinsijoittelua 1. Rampin liikennemäärän ollessa suurimmillaan (aikavälillä 150-210 min) nopeus on hidastunut erityisesti liittymässä ennen ramppia, mikä näkyy kahden mittauspisteen mallin antamana alhaisena matkanopeusestimaattina. Kuva 45 puolestaan esittää samaa tilannetta ilmaisinsijoittelulla 2. Nyt nähdään, että kahden mittauspisteen estimoi nopeuden oikein hiljaisempuna aikana, mutta yliarvioi nopeutta pahimman ruuhkan aikana, koska liittymien tilanne jää huomioimatta. Samasta syystä liikennevirtamallin antama matkanopeusestimaatti ilmaisinsijoittelulla 1 on lähempänä todellista nopeutta kuin ilmaisinsijoittelulla 2.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 44. Matkanopeusestimaatit, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee ollen 5-60 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaissijoittelu 1).

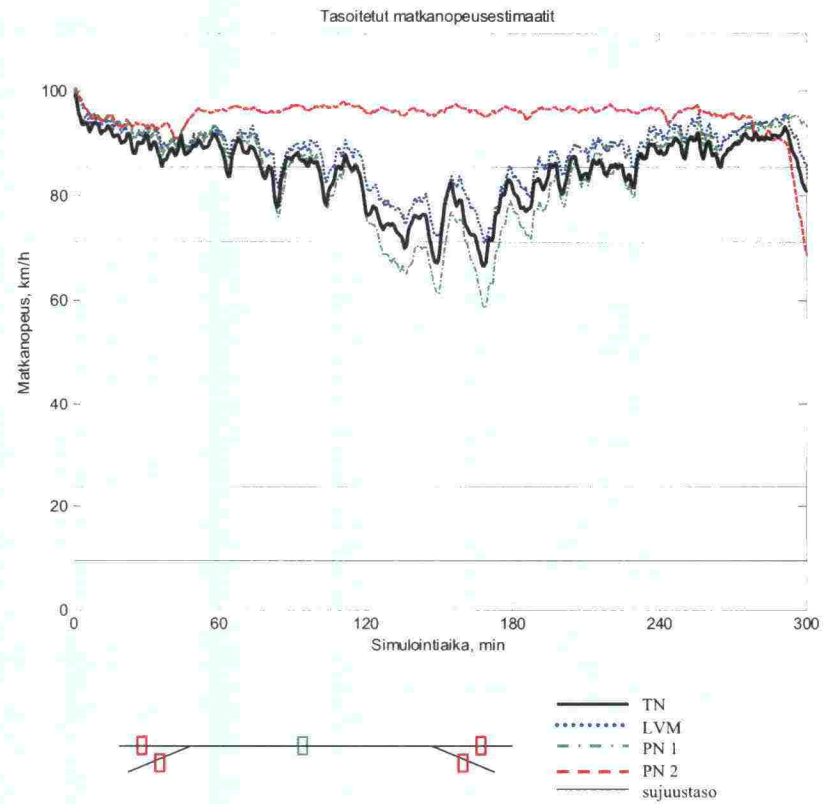


Kuva 45. Matkanopeusestimaatit, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee olleen 5-60 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaisinsijoittelu 2).

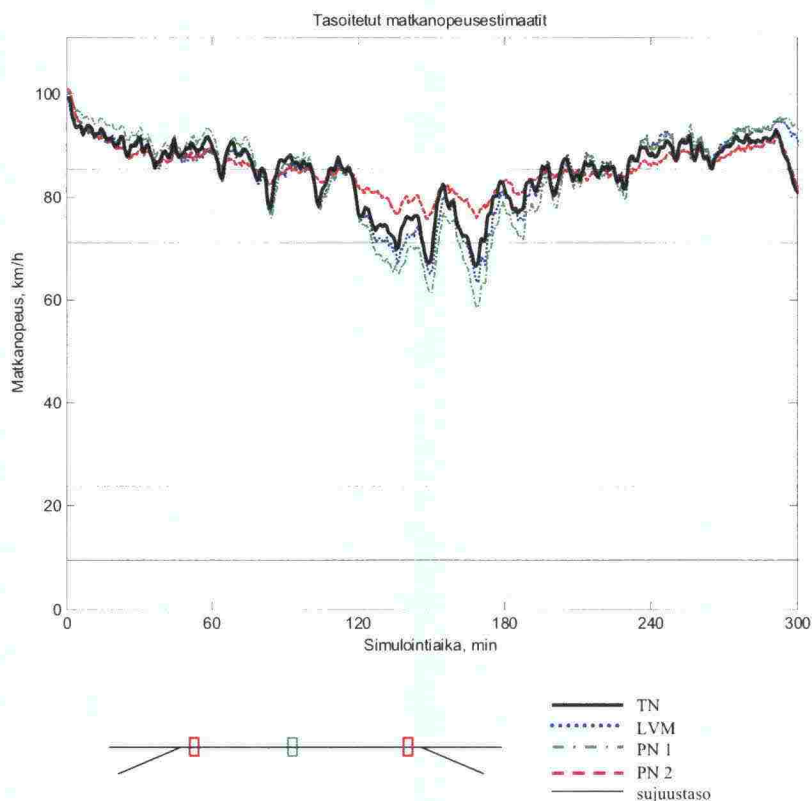
Rampille poistuvan liikenteen vaihtelu

Käytetyssä simulointimallissa rampille poistuvat ajoneuvot hidastavat nopeuttaan hieman jo ennen ramppia, mikä aiheuttaa häiriötä pääsuunnan liikennevirtaan. Kuvasta 46 huomataan, että rampille poistuvan liikenteen määrän vaihdellessa kahden mittauspisteen menetelmällä ei havaita matkanopeuden alenemaa, koska ruuhka keskittyi linkin keskelle poistumisrampista ylävirtaan. Samasta syystä yhden mittauspisteen menetelmä aliarvioi matkanopeutta. Ilmaisinsijoittelulla 2 sekä liikennevirtamalli että kahden mittauspisteen menetelmä antavat paremman tuloksen (kuva 47).

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 46. Matkanopeusestimaatit, kun rampille poistuva liikennemäärä vaihtelee ollen 5-50 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaisinsijoittelu 1).



Kuva 47. Matkanopeusestimaatit, kun rampille poistuva liikennemäärä vaihtelee ollessa 5-50 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaisinsijoittelu 2).

5.2.2 Häiriötilanteet

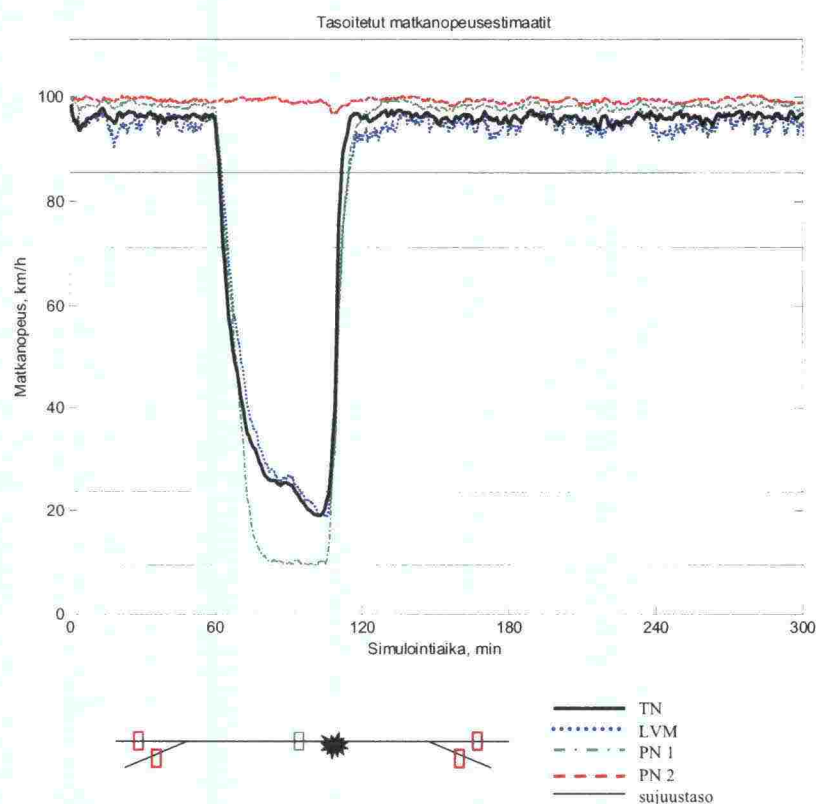
Häiriö linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen

Häiriötilanteita, joissa häiriön kesto ja sijainti vaihteli, tutkittiin useita. Ensin tutkittiin tapausta, jossa häiriö sijaitsi linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen eli alavirran puolella. Kuva 48 esittää matkanopeuksia ilmaisinsijoittelulla 1. Nopeustaso oli alentunut erityisesti linkin keskellä, mikä näkyy yhden mittauspisteen menetelmän tuottamana hyvin alhaisena matkanopeusarviona häiriön aikana. Yhden mittauspisteen menetelmä aliarvioi matkanopeutta, koska häiriön paikallisuuden ja lyhyen keston takia nopeustaso liittymissä ei laskenut, mikä nostaa linkin keskimääräistä matkanopeutta. Tästä syystä myös kahden mittauspisteen menetelmä arvioi linkin liikennetilanteen olevan vapaa. Liikennevirtamalli sen sijaan estimoiti matkanopeuden hyvin lähelle oikeaa nopeutta.

Sen sijaan ilmaisinsijoittelulla 2 (kuva 49) liikennevirtamalli ei anna yhtä hyvää nopeusestimaattia, vaan estimoitu matkanopeus on häiriötilanteessa todellista alhaisempi. Tämä johtuu siitä, että liikennetilanne liittymissä, jossa liikenne on sujuvampaa, jää huomioimatta. Kuvasta 49 huomataan myös,

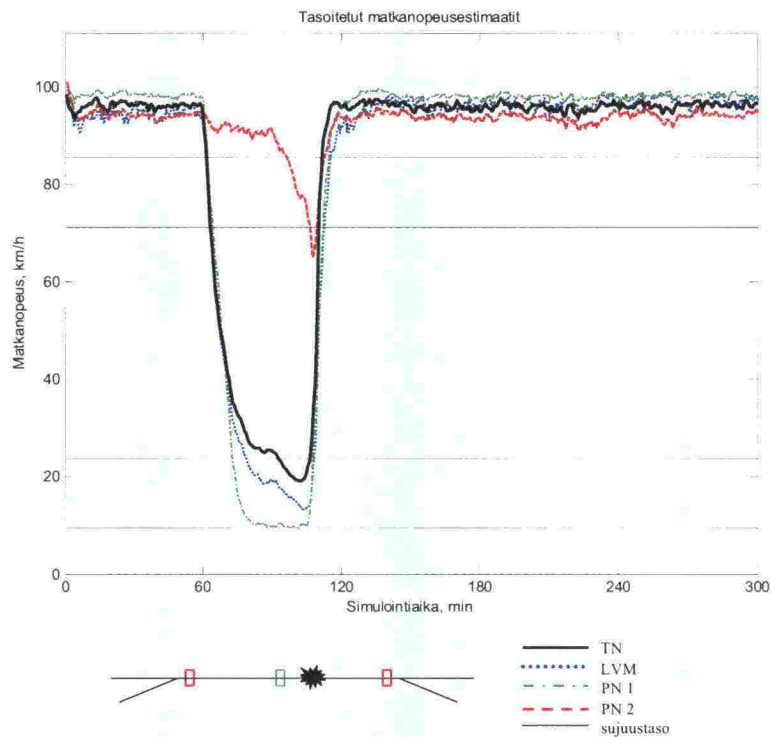
SIMULOINTITULOKSET

että häiriötilanteen loppupuolella ruuhka alkaa jo ulottua ylävirran ilmaisimelle, sillä kahden mittauspisteen menetelmän matkanopeusestimaatti laskee.



Kuva 48.

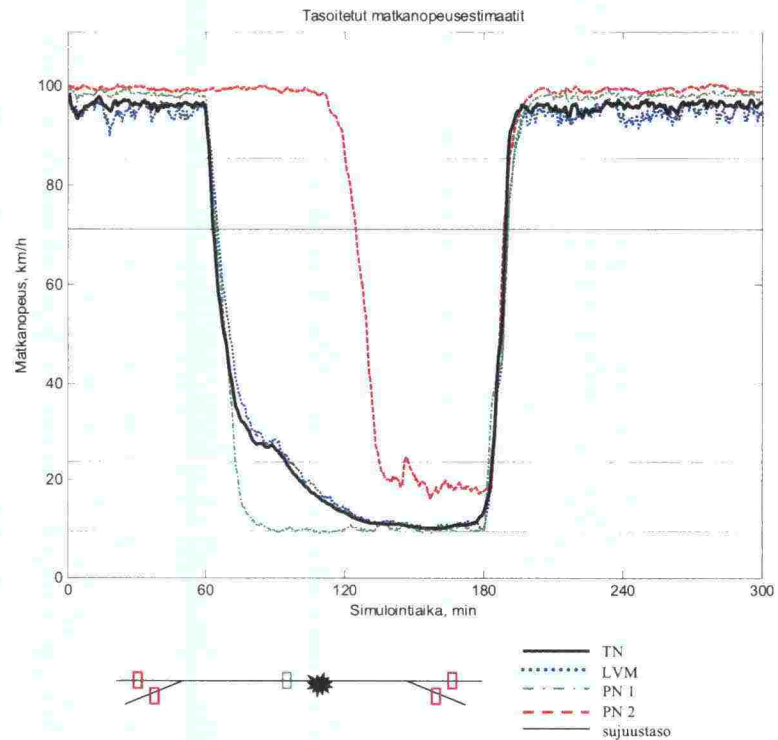
Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1). Häiriön sijainti linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen.



Kuva 49. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2). Häiriön sijainti linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen.

Kun häiriön kesto oli kaksi tuntia, myös kahden mittauspisteen menetelmä ehtii reagoida (kuva 50). Huomataan, että matkanopeus on laskenut häiriön kestäessä niin paljon, että yhden mittauspisteen menetelmän antama nopeusarvio on häiriön lopussa hyvin lähellä toteutunutta matkanopeutta.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 50. Matkanopeusestimaatit 2 tunnin häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1). Häiriön sijainti linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen.

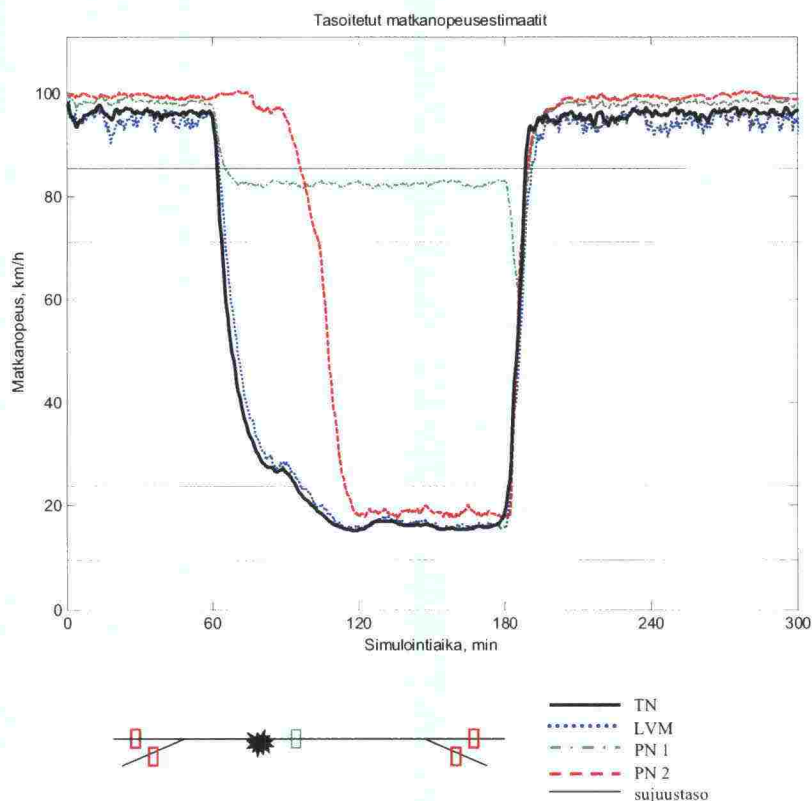
Häiriö ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia

Kun häiriö sijaitsee ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia eli ylävirran puolella, on häiriö vaikea havaita myös yhden mittauspisteen menetelmällä. Jos häiriö sijaitsee hyvin lähellä ilmaisimia, näkyy häiriö ilmaisimilla pistenopeuden pienenä alenemana. Tämä johtuu siitä, että vaikka häiriön (pullonkaulan) jälkeen liikennetilanne on vapaa ja väylän kapasiteetti riittää, ajoneuvot eivät ehdi kiihdyttää tavoitenopeuteensa häiriön aiheuttaman nopeuden hidastumisen jälkeen.

Häiriötilanteen lopussa havaitaan linkin keskellä olevalla ilmaisimella mitatussa pistenopeudessa piikkimäinen alenema. Ilmiö johtuu siitä, että häiriön poistuessa kertynyt jono lähtee liikkeelle eli liikennemäärä kasvaa ja nopeus alenee. Myöskään ohittaminen ei suuren liikennemäärän takia ole mahdollista, joten hitaat ajoneuvot estävät muita saavuttamasta tavoitenopeuttaan. Tilanne on esitetty kuvassa 51. Tässä tapauksessa häiriön kestoksi asetettiin kaksi tuntia.

Häiriön kestäessä tarpeeksi pitkään jono ulottuu ylävirran ilmaisimille ja kahden mittauspisteen menetelmälläkin havaitsee nopeuden aleneman. Ilmaisinsijoittelu ei juurikaan vaikuta kahden mittauspisteen menetelmän ja liikennevirramallin antamaan tulokseen tässä tapauksessa. Ilmaisinsijoittelulla 2 ruuhka luonnollisesti havaitaan myös kahden mittauspisteen menetelmällä nope-

ammin, koska ilmaisimet sijaitsevat lähempänä häiriötä. Kuva on esitetty liitteessä 1.

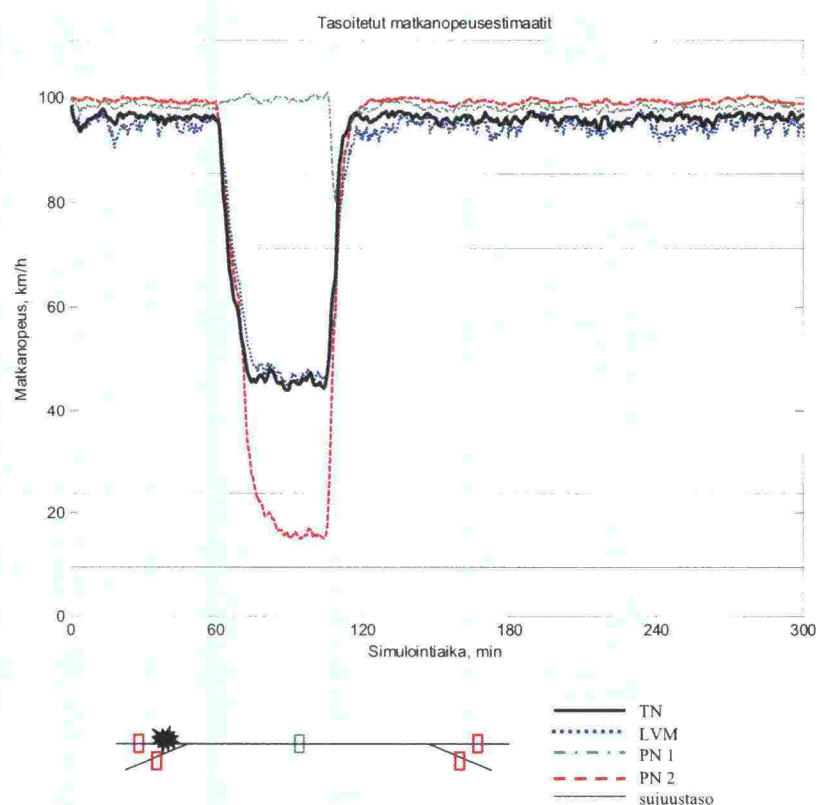


Kuva 51. Matkanopeusestimaatit 2 h häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1). Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia.

Häiriö linkin aloittavassa liittymässä

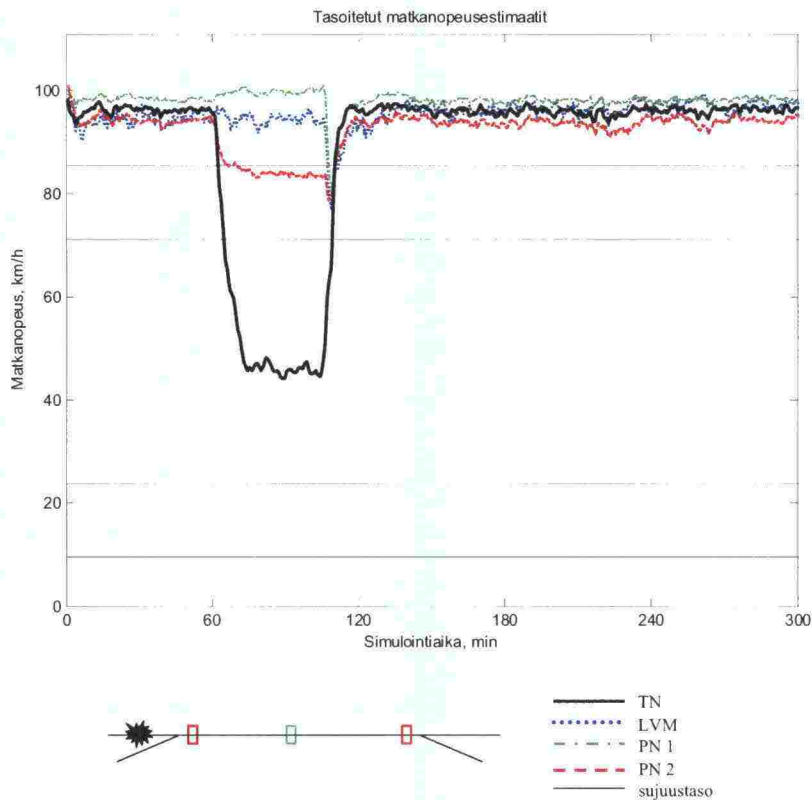
Häiriö voi sijaita myös liittymässä. Kuvasta 52 nähdään eri estimointimenetelmien suoriutuminen, kun 45 min kestävä häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä. Yhden mittauspisteen menetelmä ei häiriötä havaitse (paitsi ruuhkan purkautumisen aiheuttaman piikin pistenopeuksissa) ja kahden mittauspisteen menetelmä yliarvioi ruuhkaa. Liikennevirtamalli sen sijaan pärjää ilmaisinsijoittelulla 1 hyvin.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 52. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1), kun häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä.

Ilmaisinsijoittelulla 2 tilanne on toinen (kuva 53). Mikään malleista ei pysty estimoimaan matkanopeutta oikein, koska tilannetta liittymissä ei havaita. Kahden mittauspisteen menetelmä pärjää kuitenkin parhaiten, koska ilmaisimet ovat lähellä häiriöpaikkaa eivätkä ajoneuvot ehdi kiihdyttää tavoitenopeuteensa häiriön jälkeen.

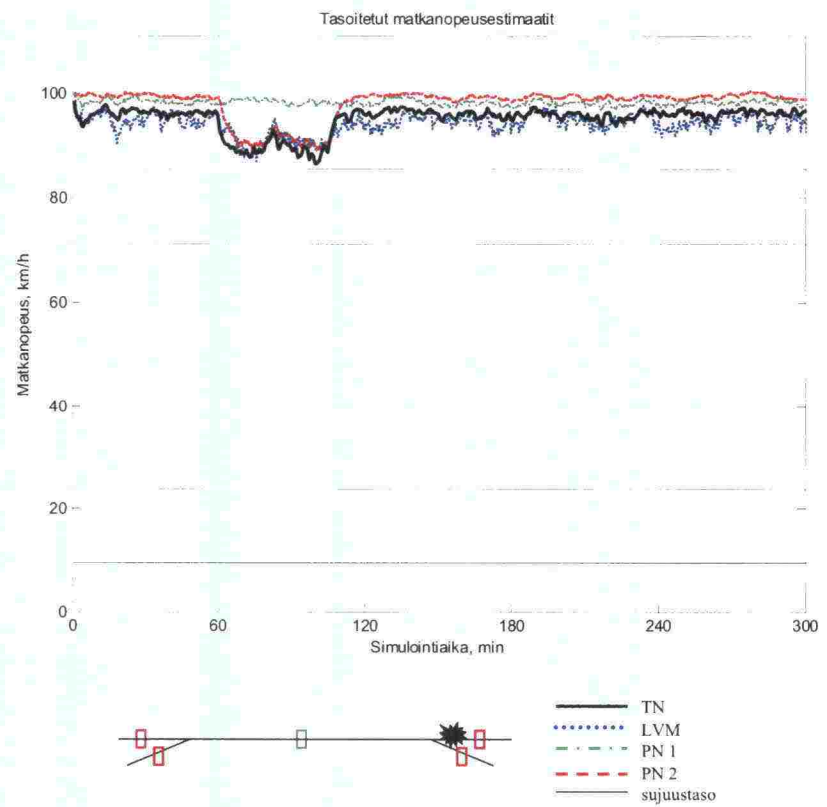


Kuva 53. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2), kun häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä.

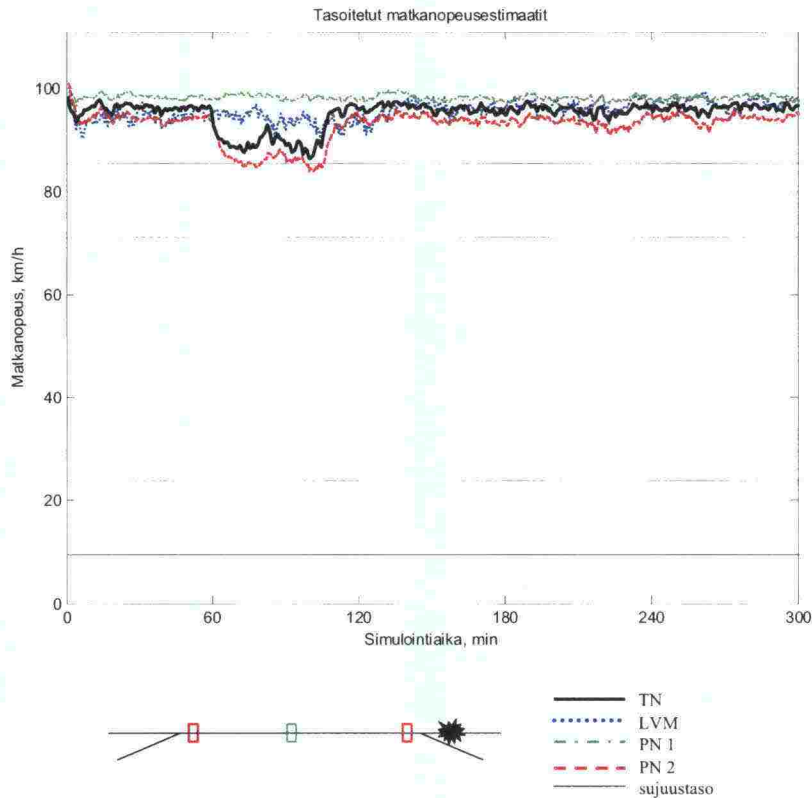
Häiriö linkin päättävässä liittymässä

Linkin jälkimmäisessä liittymässä oleva häiriö näkyy sekä liikennevirtamallin että kahden mittauspisteen menetelmän antamassa matkanopeusestimaatissa (kuvat 54 ja 55). Ilmaisinsijoittelu 1 antaa molemmissa paremman tuloksen kuin ilmaisinsijoittelu 2, koska ongelma on liittymässä eikä ilmaisinsijoittelulla 2 havaita liittymien tilannetta. Simuloinnissa matkanopeus ei kuitenkaan ole alentunut kovin paljon, joten ilmaisinsijoittelulla 2 ei tässä tapauksessa tehdä kovin suurta virhettä.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 54. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1), kun häiriö sijaitsee linkin päättävässä liittymässä.

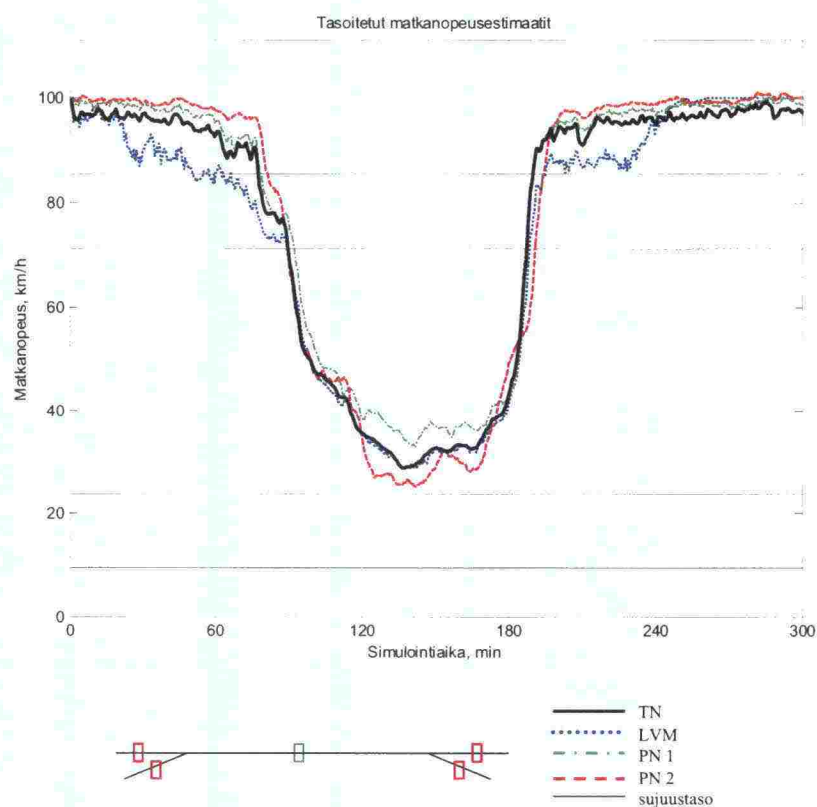


Kuva 55. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2), kun häiriö sijaitsee linkin päättävässä liittymässä.

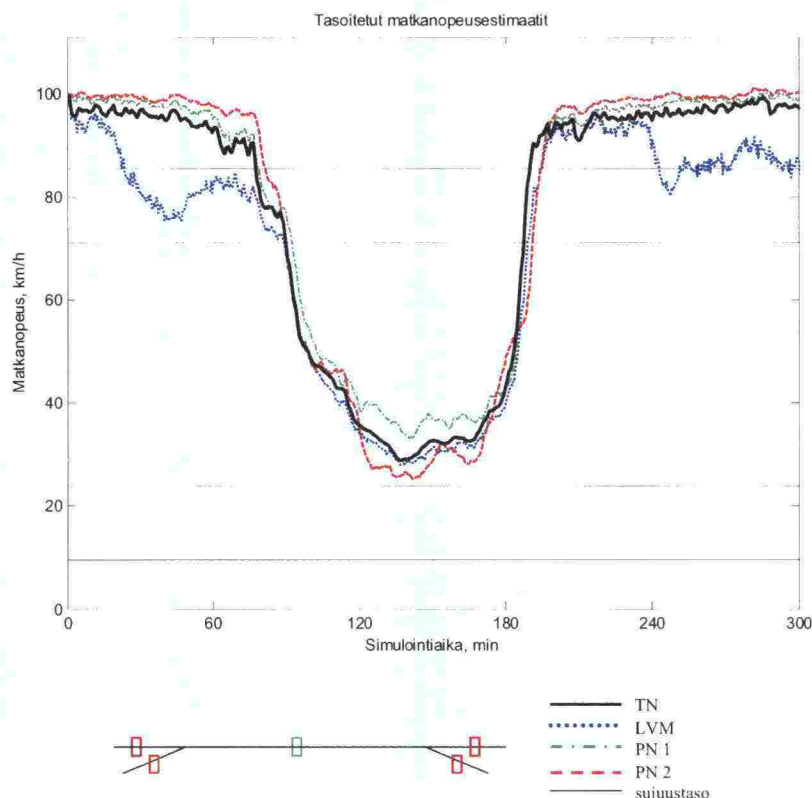
5.2.3 Ilmaisinvirheet

Ilmaisinvirheiden vaikutusta tutkittiin iltaruuhkan ja kesän iltaruuhkan liikennemäärillä useilla erilaisilla virheprosentteilla jättämällä simulointituloksista satunnaisesti tietty osa havainnoista pois laskennasta. Kuvissa 56 ja 57 on esitetty esimerkkitalanteet, kun kaikkien ilmaisinten virheprosentit olivat 0,5 % ja 1 %. Jos havaitsematta jäisi systemaattisesti jokaisella ilmaisimella aina joka 200. tai 100. ajoneuvo, ei matkanopeusestimaattiin muodostuisi virhetä. Virhe kertyy kuitenkin satunnaisesti, koska sattuma vaikuttaa siihen, mikä ajoneuvo jää havaitsematta milläkin ilmaisimella. Lisää kuvia ilmaisinvirheita-pauksista on esitetty liitteessä 1.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 56. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun kaikissa ilmaisimisissa oli 0,5 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).



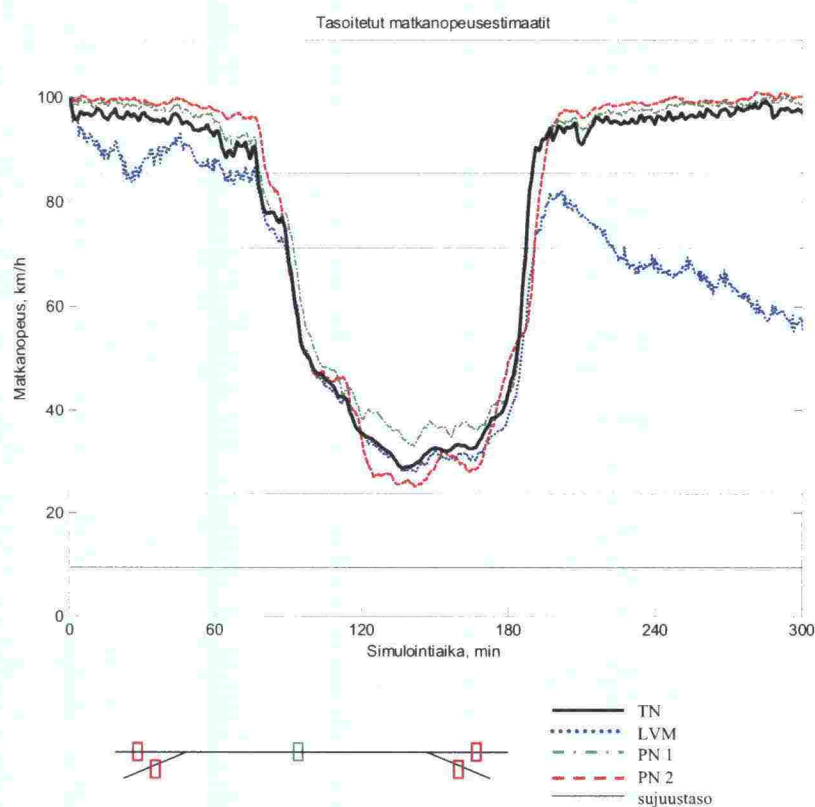
Kuva 57. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun kaikissa ilmaisimissa oli 1 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

Ilmaisinvirheiden vaikutusta testattiin myös tapauksessa, jossa ilmaisimilla on erisuuruinen virheprosentti. Jos linkin alussa olevien eli tulevaa liikennettä mittaavien ilmaisimien virheprosentti on poistuvaa liikennettä mittaavien ilmaisinten virhettä suurempi, liikennetiheysestimaatti pienenee ja saattaa ilman rajoittamista mennä jopa negatiiviseksi. Vastaavasti jos linkin lopussa olevien ilmaisimien virheprosentti on linkin alkupään ilmaisinten virhettä suurempi, kasvaa liikennetiheysestimaatti vähitellen hyvin suureksi.

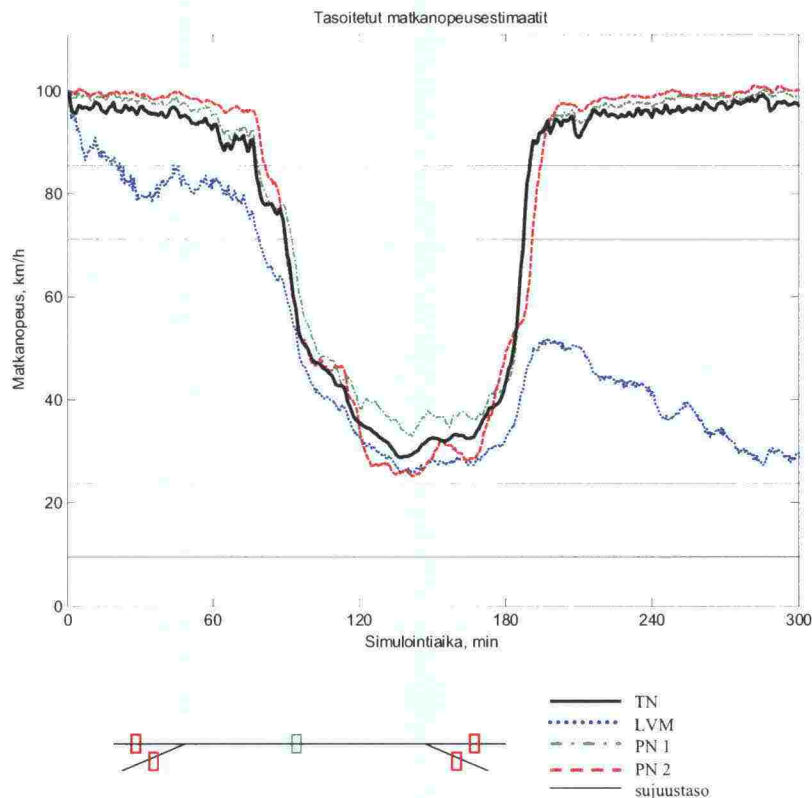
Kuvassa 58 virheprosentti linkin alussa olevissa ilmaisimissa on 0,3 % ja linkin lopussa olevissa ilmaisimissa 0,5 %. Vaikka virheiden ero ei ole suuri, liikennevirtamallin estimaattiin kertyy parissa tunnissa suuri virhe. Jos ilmaisimien virheprosenttien ero tiedetään, tilannetta voidaan yrittää korjata käyttämällä korjauskertoimia. Oletus, että yksittäisen ilmaisimen virheprosentti tiedettäisiin näin tarkasti, lienee kuitenkin vailla todellisuuspohjaa. Lisäksi virheprosentti saattaa vaihdella mm. liikennetilanteen mukaan. Kuvassa 59 on esitetty tilanne, jossa virheprosentit ovat 0,5 % (linkin alussa) ja 1,0 % (linkin lopussa). Nyt virheen kertyminen on vielä edellistä nopeampaa.

Lisää kuvia ilmaisinvirhetapauksista on esitetty liitteessä 1.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 58. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun linkin alussa olevissa ilmaisimissa oli 0,3 % ja linkin lopussa olevissa ilmaisimissa oli 0,5 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).



Kuva 59. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun linkin alussa olevissa ilmaisimissa oli 0,3 % ja linkin lopussa olevissa ilmaisimissa oli 0,8 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

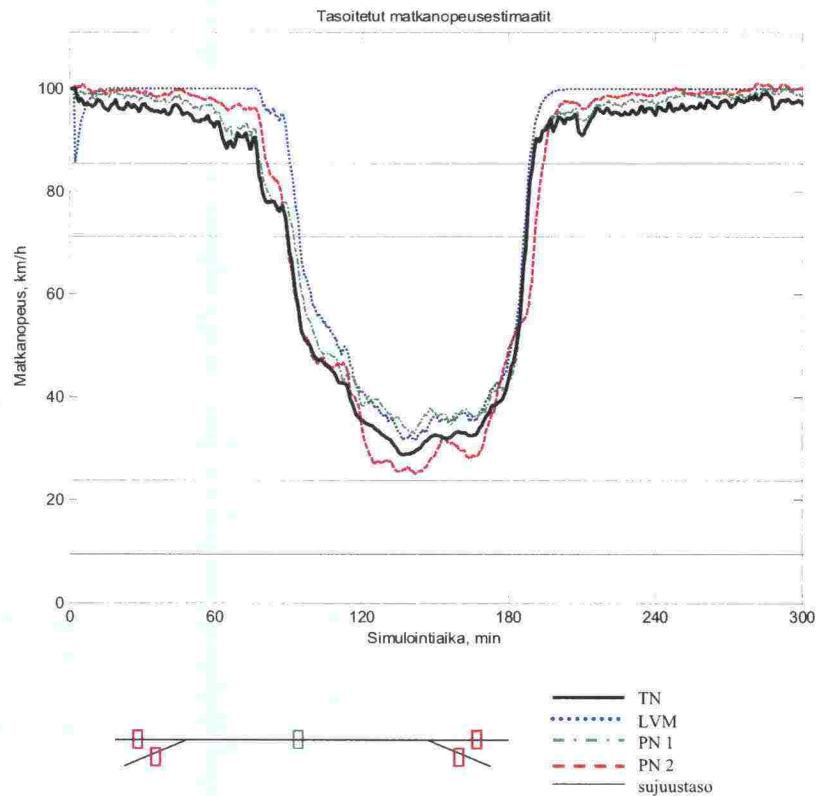
Ruuhkatilanteessa liikennevirtamalli antaa ilmaisinvirheitäkin sisältävillä lähtötiedoilla kohtuullisia, vapaata tilannetta parempia tuloksia. Tämä johtuu siitä, että ruuhkassa liikennetiheyteen aiheutuu pienempi suhteellinen virhe kuin vapaassa liikennetilanteessa. Liikennetilanteen ollessa vapaa liikennetiheys on noin 10–15 ajon/km ja ruuhkassa noin 50–60 ajon/km. Vastaavasti liikennemäärämittaukseksi on vapaassa tilanteessa saatu noin 2500 ajon/h ja ruuhkassa noin 3500 ajon/h. Nyt jos linkin alussa sijaitsevat ilmaisimet havaitsevat kaikki ajoneuvot ja lopussa sijaitsevat ilmaisimet jättävät 1 % havaitsematta, kertyy vapaassa tilanteessa yhden tunnin aikana tehtyihin havaintoihin virhettä 25 ajoneuvoa ja ruuhkassa 35 ajoneuvoa. Tämä aiheuttaa vapaan tilanteen liikennetiheyteen (10–15 ajon/km) paljon suuremman suhteellisen virheen kuin ruuhkatilanteen liikennetiheyteen (50–60 ajon/h). Liikennemäärässä suhteellinen virhe pysyy sen sijaan samana.

5.2.4 Liikennetiheyden alkuarvo ja arvioiminen varausasteen perusteella

Liikennevirtamallin tarvitsema liikennetiheydestimaatin alkuarvo voidaan joissain tilanteissa joutua arvioimaan ilmaisimen varausasteen perusteella. Aina ei välttämättä löydetä hetkeä, jolloin linkillä ei ole yhtään ajoneuvoa. Toisaalta liikennevirtamallin laskenta saatetaan haluta aloittaa alusta ilmaisinvirheiden tuottaman kumulatiivisen virheen takia.

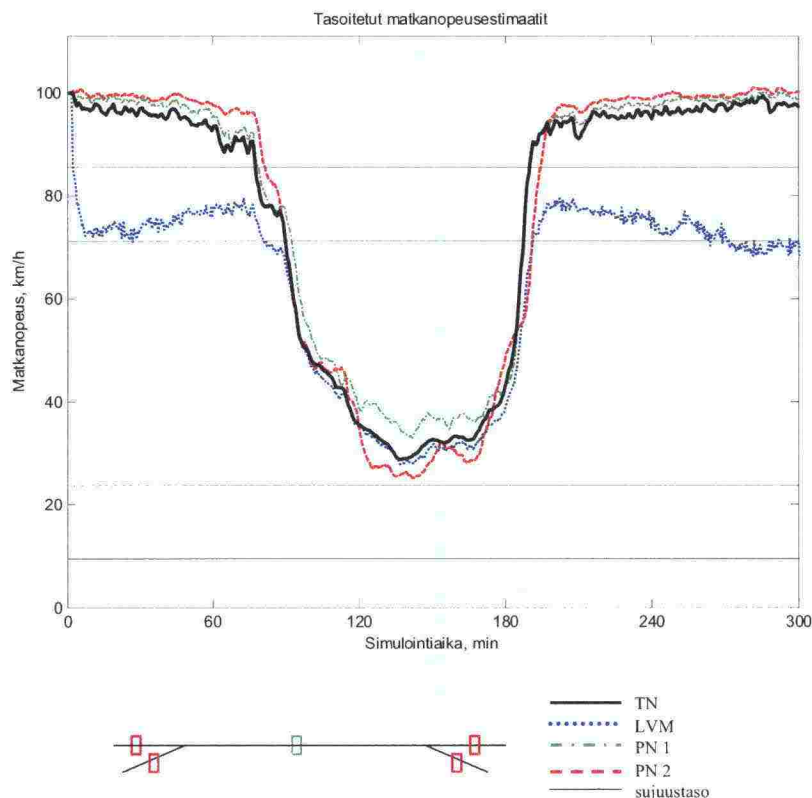
SIMULOINTITULOKSET

Simuloinnilla tarkasteltiin, miten herkkä liikennevirtamalli on liikennetiheyden alkuarvon virheelle. Kuvassa 60 on esitetty liikennevirtamallin matkanopeusestimaatit, kun liikennetiheyden alkuarvo on arvioitu linkin alussa ja lopussa olevien ilmaisinten varausasteiden keskiarvon perusteella. Laskennassa ei huomioitu simuloinnin alussa saatuja tuloksia, vaan laskenta aloitettiin, kun simuloinnin alusta oli kulunut 2,5 minuuttia (tämä näkyy kuvassa 60 kuvaajien alussa). Oikea liikennetiheyden alkuarvo oli tällöin 11,1 ajon/km, ja varausasteiden perusteella laskettu 7,3 ajon/km. Liikennevirtamalli yliarvioi matkanopeutta, koska liikennetiheysarvo laskennassa on koko ajan 3,8 ajon/km todellista liikennetiheyttä pienempi. (Kuvassa 60 on huomattava, että liikennevirran nopeusestimaatin maksimiarvoksi oli asetettu 100 km/h.)



Kuva 60. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun liikennetiheyden alkuarvo on arvioitu ilmaisimen varausasteen perusteella (ilmaisinsijoittelu 1).

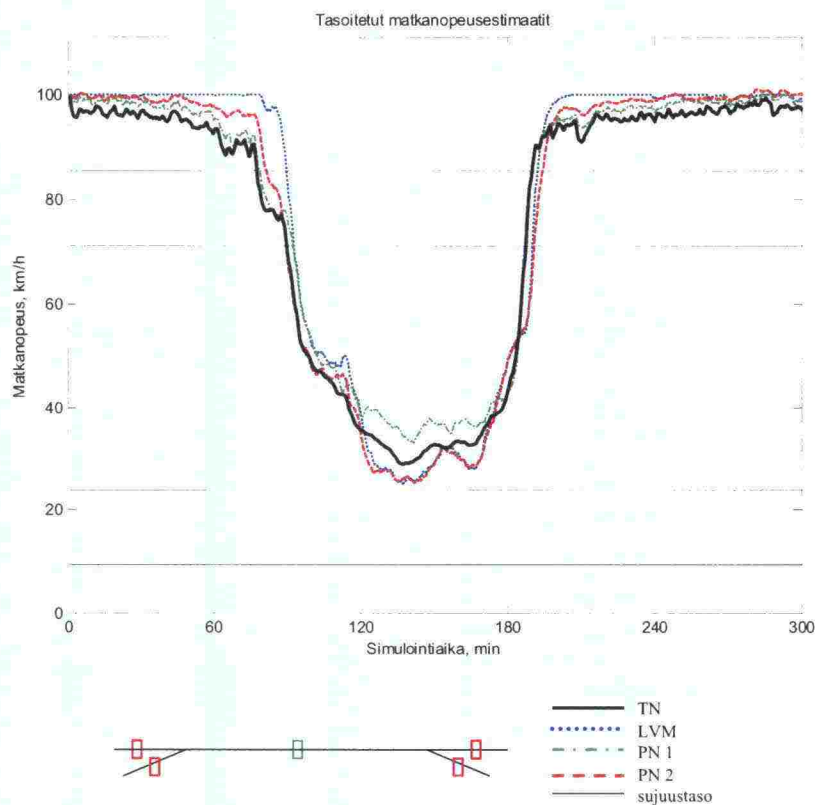
Liikennetiheyden vastaavan suuruisen yliarvioinnin vaikutusta testattiin käyttämällä liikennetiheyden alkuarvona arvoa 14,9 ajon/km. Tässäkin tapauksessa laskenta aloitettiin, kun simulointia oli kestänyt 2,5 minuuttia. Nyt liikennevirtamalli aliarvioi matkanopeutta, koska oikea liikennetiheys on 3,8 ajon/km laskennassa käytettyä arvoa pienempi (kuva 61). Virhe näkyy etenkin hiljaisemmalla liikenteellä, mutta ruuhkassa sama absoluuttinen virhe tuottaa pienemmän suhteellisen virheen ja siksi liikennevirtamallin matkanopeusestimaatti ei epäonnistu yhtä pahasti.



Kuva 61. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun liikennetiheyden alkuarvoksi on arvioitu 14,9 ajon/km oikean arvon ollessa 11,1 ajon/km (ilmaisinsijoittelu 1).

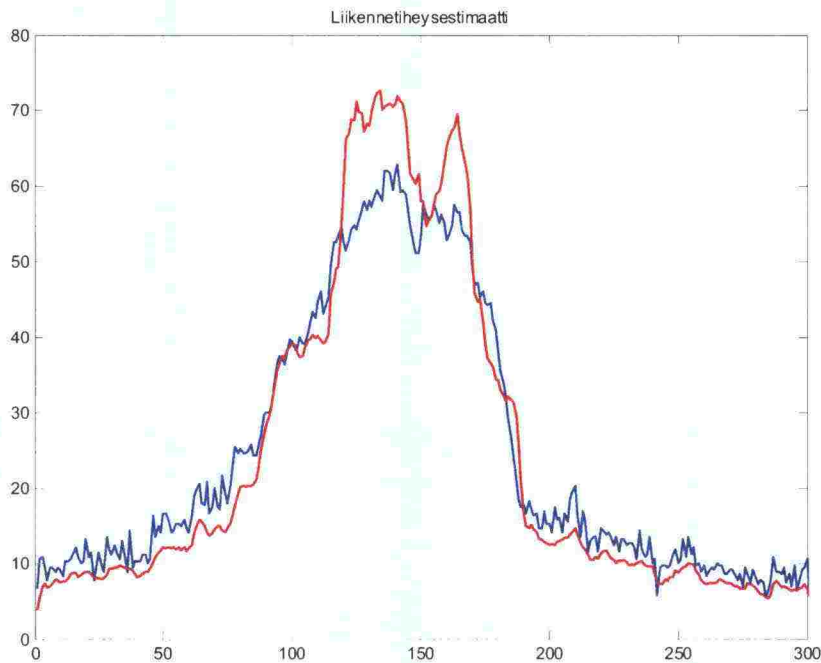
Simuloinnilla testattiin myös, miten hyvin liikennetiheyttä voitaisiin arvioida pelkkien ilmaisimien varausastetietojen perusteella. Estimaatti on luonnollisesti hyvä, jos liikennetilanne linkillä on homogeeninen. Varusasteen perusteella laskettu liikennetiheys edustaa kuitenkin tilannetta vain ilmaisimen kohdalla, eikä pistemäinen liikennetiheys (varusaste) ole yleistettävissä koko linkille sen paremmin kuin pistenopeuskaan. Kuvassa 62 on esitetty iltaruuhkan matkanopeusestimaatti, kun liikennetiheys on arvioitu pelkästään ilmaisimen varusasteen perusteella (jälleen on huomattava, että liikennevirtamallin nopeusestimaatti oli rajoitettu arvoon 100 km/h). Tulos on kohtuullisen hyvä, koska liikennetilanne linkillä on ollut melko homogeeninen. Estimaatti on kuitenkin hyvin lähellä kahden mittauspisteen menetelmän estimaattia. Kuvassa 63 on esitetty oikea (eli liikennevirtamallin käyttämä) iltaruuhkan liikennetiheys sekä ilmaisimen varusasteen perusteella laskettu liikennetiheys.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 62.

Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun liikennetiheys on arvioitu ilmaisimen varausasteen perusteella (ilmaisinsijoittelu 1).



Kuva 63. Ilmaisimen varausasteen perusteella arvioitu iltaruuhkan liikennetiheys (punainen) ja oikea liikennetiheys (sininen).

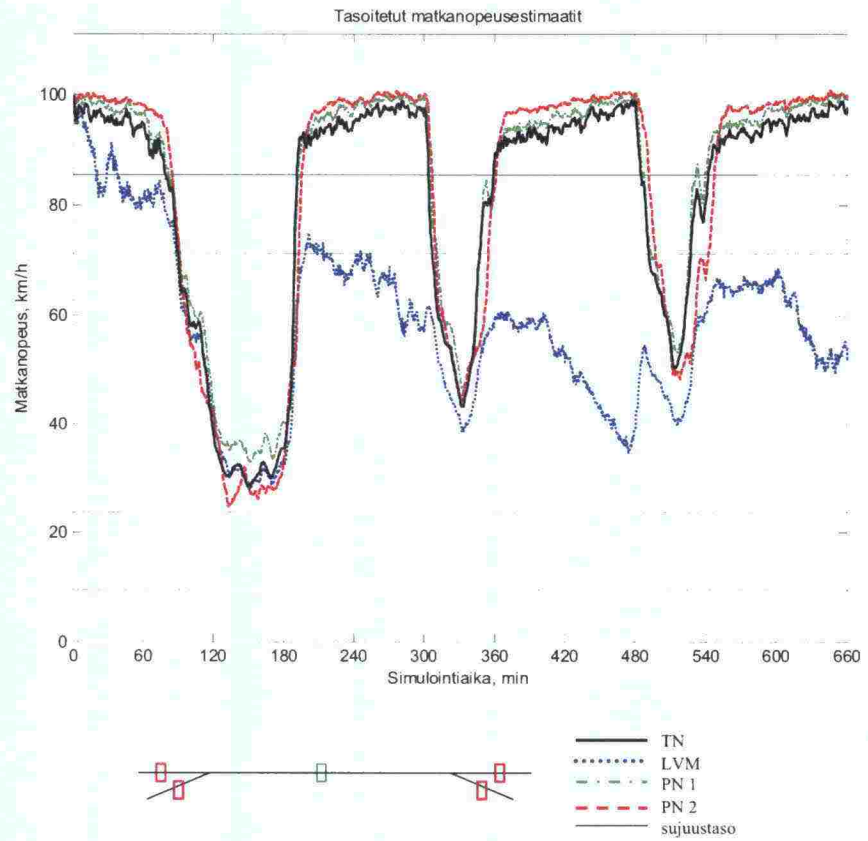
5.2.5 Liikennevirtamallin kumuloituvan virheen korjaaminen

Liikennevirtamalliin kumuloituvan virheen korjaamista testattiin kahdella eri simulointiajolla, joissa oli kaksi tai kolme ruuhkahuippua peräkkäin. Kuvassa 64 on esitetty esimerkkitapaus matkanopeusestimaattien käyttäytymisestä, kun kaikissa ilmaisimissa oli 1 % virhe. Liikennevirtamallin matkanopeusestimaatti harhautuu heti ensimmäisen ruuhkahuipun jälkeen väärälle tasolle.

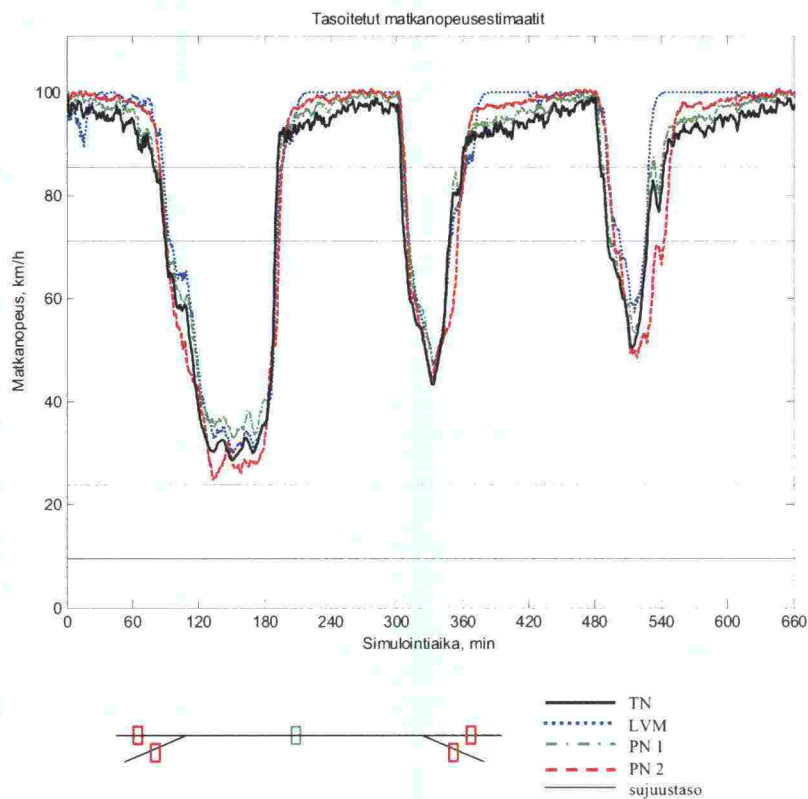
Kuvassa 65 on esitetty tilanne, jossa liikennevirtamallin matkanopeusestimaattia korjattiin ilmaisimen varausasteen avulla. Kuvassa 66 on esitetty tilanne, jossa liikennevirtamallin estimaattia korjattiin vapaan liikennevirran matka-ajan aikana mitatun ajoneuvomäärän avulla. Huomataan, että molemmilla tekniikoilla matkanopeusestimaatti korjautuu vapaan tilanteen aikana lähelle oikeaa tasoa siten, että ruuhkassa estimoitu nopeus on varsin lähellä todellista nopeutta.

Simulointiajossa liikennetilanne on liittymissä ollut koko linkin keskimääräistä liikennetilannetta vapaampi. Sekä ilmaisimen varausastetta että vapaan virran matka-ajan aikana havaittua ajoneuvomäärää käyttävä tekniikka tuottaa korjauksessa todellista liikennetiheyttä alhaisemman liikennetiheysestimaatin. Tämä näkyy kuvissa 65 ja 66 todellista nopeutta korkeampana nopeusarviona.

SIMULOINTITULOKSET

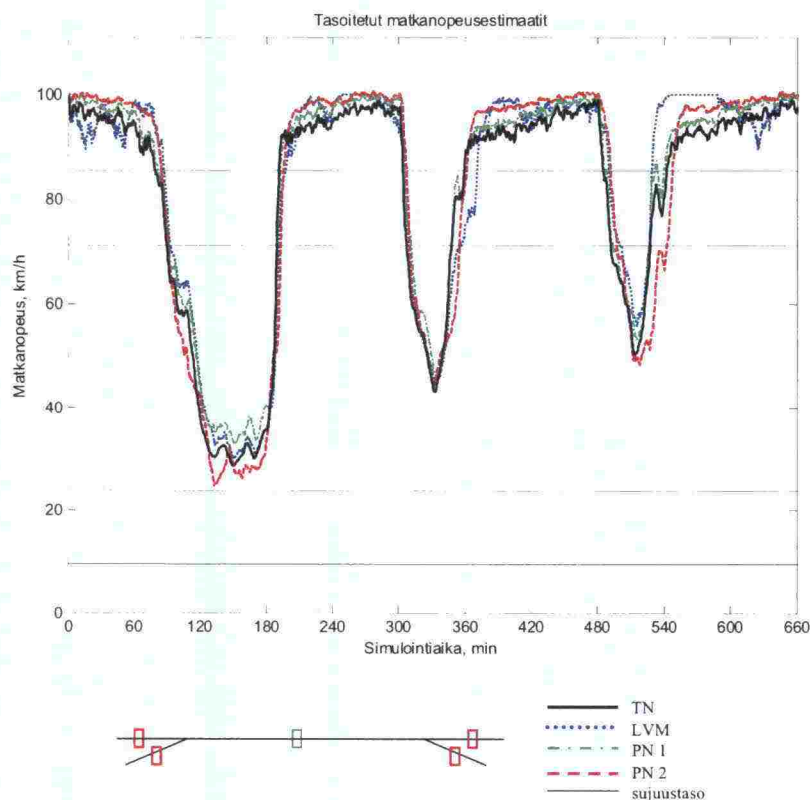


Kuva 64. Matkanopeusestimaatit ensimmäisessä korjaustapauksessa, kun kaikissa ilmaisimissa oli 1 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).



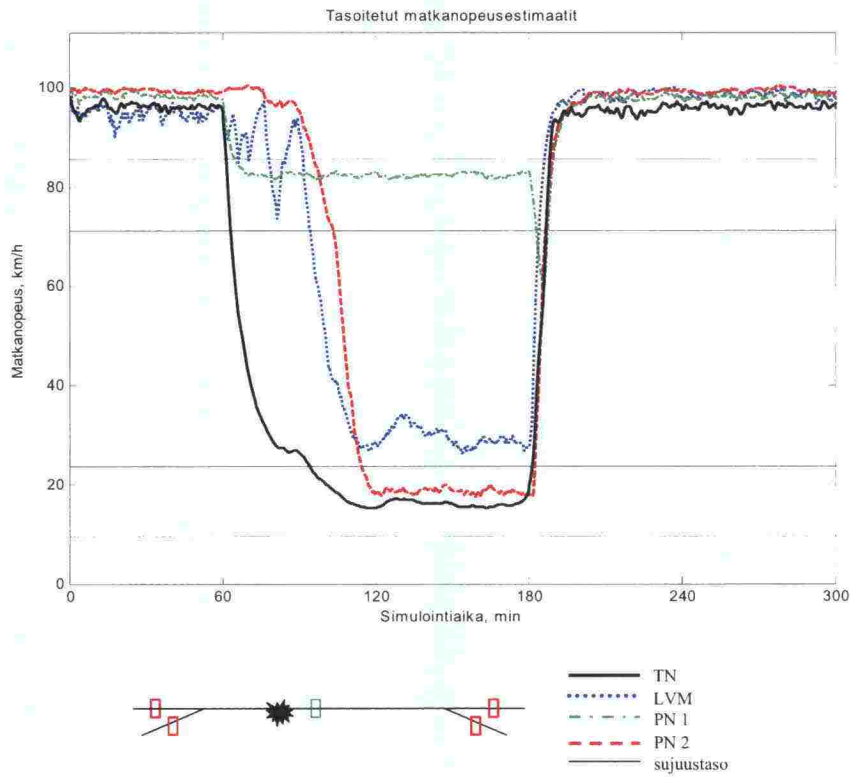
Kuva 65. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 64. Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu ilmaisimen varausasteen avulla.

SIMULOINTITULOKSET



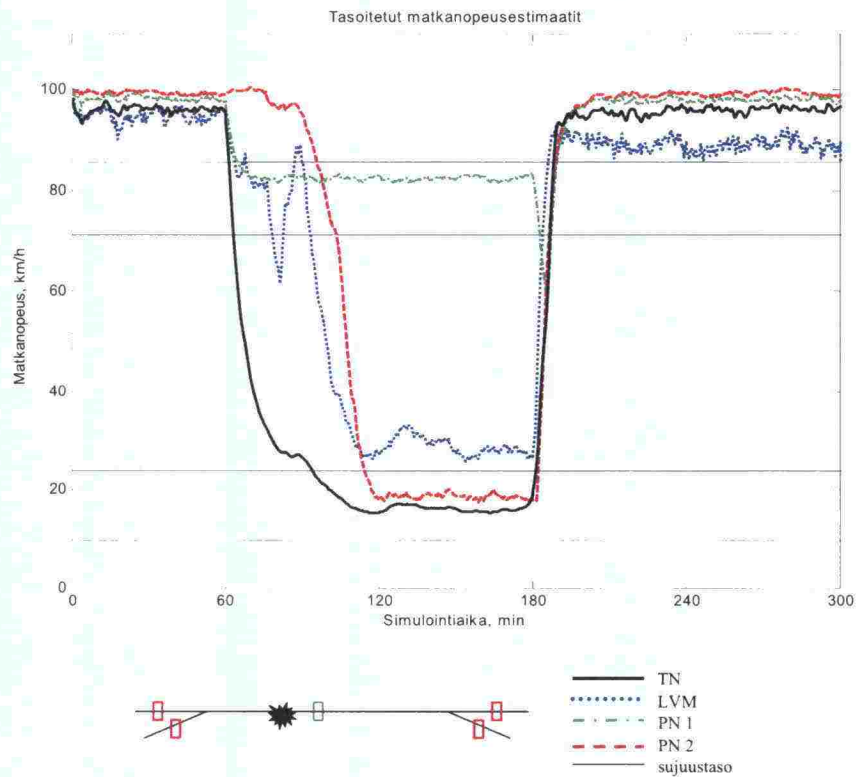
Kuva 66. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 64. Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu vapaan virran matka-ajan aikana havaittujen ajoneuvomäärien avulla.

Liikennetilanteen ollessa linkillä epähomogeeninen, linkin päissä mitattu va-rausaste ja pistenopeus voivat antaa tilanteesta virheellisen kuvan. Tämä korostuu erityisesti sellaisissa häiriötilanteissa, joissa paikallinen häiriö ruuh-kauttaa linkin keskiosaa, mutta tilanne liittymissä vastaa vapaata liikenneti-lannetta. Tällainen tilanne on esitetty kuvissa 67 ja 68. Vaikka ilmaisinvirhet-tä ei ole, molemmat korjaustekniikat päättelevät tilanteen väärin ja korjaavat liikennevirran matkanopeusestimaattia, vaikka korjausta ei pitäisi tehdä. Jot-ta tarpeetonta korjausta ei tehtäisi häiriötilanteissa, tulisi ehtoja vapaan lii-kennetilanteen päättelemiseksi kehittää. Esimerkiksi eroa linkin alussa ja lo-pussa mitatuissa liikennemäärissä voitaisiin käyttää toteamaan, onko liiken-netilanne linkillä vapaa vai ei.



Kuva 67. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 51 (2 h häiriö ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia). Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu ilmaisimen varausasteen avulla.

SIMULOINTITULOKSET

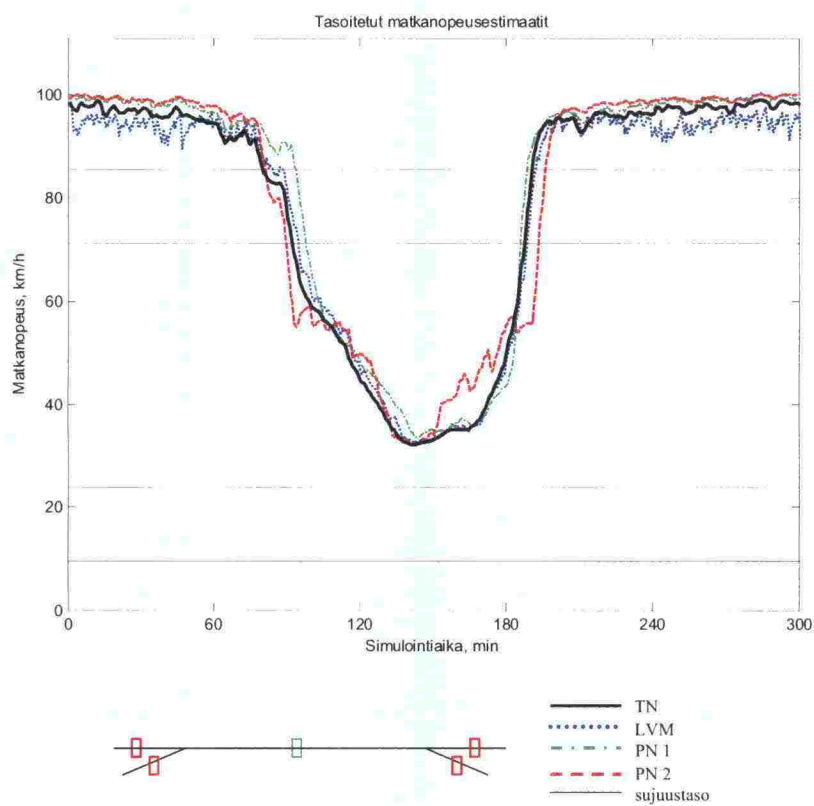


Kuva 68. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 51 (2 h häiriö ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia. Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu vapaan virran matka-ajan aikana havaittujen ajoneuvomäärien avulla.

Lisää kuvia liikennetiheysestimaatin korjaamisesta on esitetty liitteessä 1.

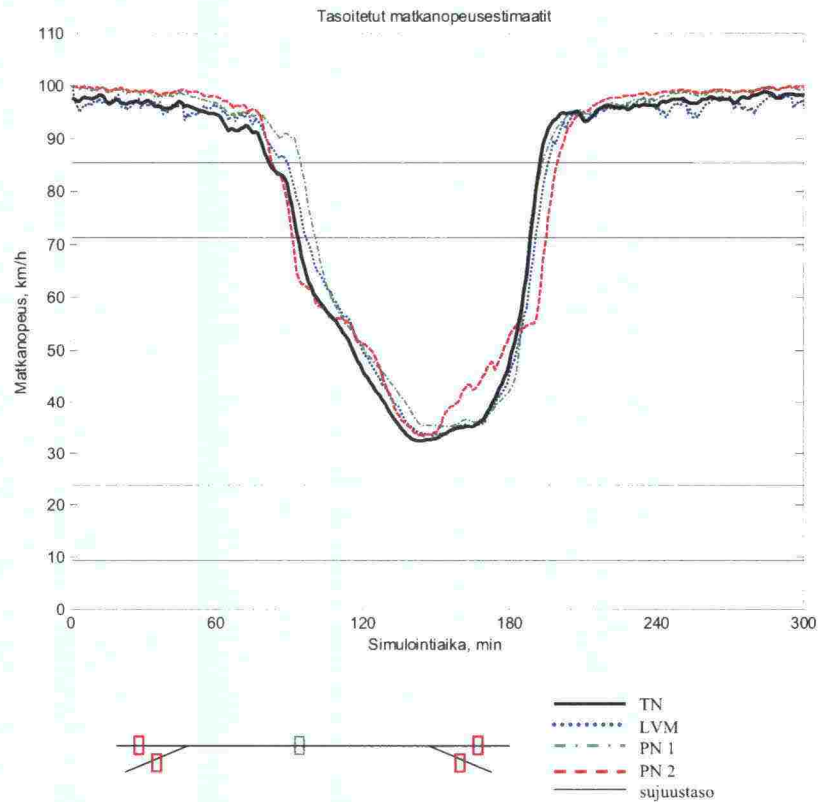
5.2.6 Linkin pituus

Linkin pituuden vaikutusta tutkittiin simuloimalla muutamia liikennetilanteita 3,3 km pituisella linkillä. Kuvassa 69 nähdään matkanopeusestimaatit iltaruuhkan liikennemäärillä. Liikennevirtamallin estimaatti on yhtä hyvä kuin lyhyemmälläkin linkillä. Jälleen pistenopeuteen perustuvat menetelmät pärjäävät varsin hyvin, koska liikennetilanne on varsin homogeeninen koko linkillä. Mittauksissa esiintyvää kohinaa yritettiin pitkällä linkillä vähentää asettamalla laskentaväliksi 60 s. Matkanopeusestimaattien kohina vaimeni huomattavasti (kuva 70).



Kuva 69. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä (ilmaisinsijoittelu 1), kun $\Delta t = 30$ s.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 70. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä (ilmaisinsijoittelu 1), kun $\Delta t = 60$ s.

Pitkällä linkillä tutkittiin iltaruuhkan lisäksi erilaisia häiriötilanteita ja rampilta tulevan liikenteen osuuden vaikutusta. Tulokset olivat hyvin samantapaisia kuin lyhyemmällä linkillä. Häiriön havaitseminen pistenopeusmenetelmillä oli luonnollisesti hitaampaa, koska ilmaisimien väliset etäisyydet olivat pidemmät. Lyhytkestoisissa häiriötilanteissa kahden mittauspisteen menetelmä ei havainnut nopeuden alenemaa niissä tilanteissa, joissa nopeuden alenema havaittiin lyhyellä linkillä. Kuvia pidemmän linkin simulointituloksista on esitetty liitteessä 1.

Yhteenvedo liikennevirtamallin ja pistenopeusmenetelmien simulointituloksista kaikilla tarkastelluilla tapauksilla on esitetty liitteessä 3.

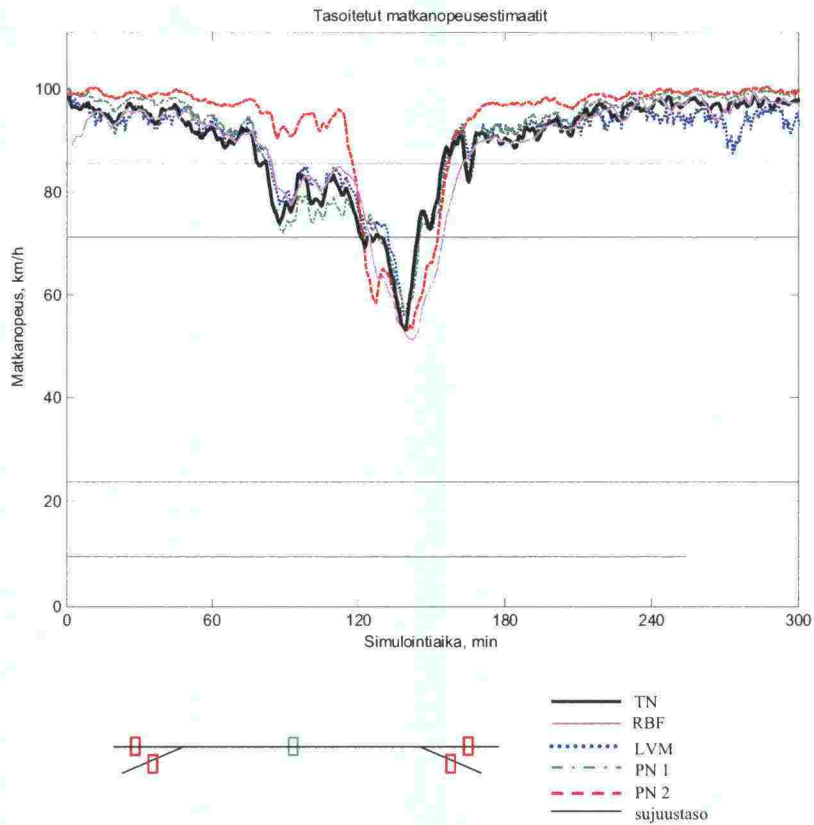
5.3 Neuroverkkojen tulokset

5.3.1 Liikennemäärän muutoksen vaikutus

Ensin neuroverkkojen toimivuutta tarkasteltiin tapauksilla iltaruuhka 2 ja kesäliikenteen iltaruuhka 2. Iltaruuhkan tulokset on esitetty kuvissa 71 ja 72. Molemmat neuroverkot estimoivat matkanopeuden kohtuullisen hyvin. Pistenopeuteen perustuvat menetelmätkin pärjäävät hyvin, koska liikennetilanne linkillä on ollut homogeeninen. Tosin ilmaisinsijoittelulla 1 (neuroverkko 1)

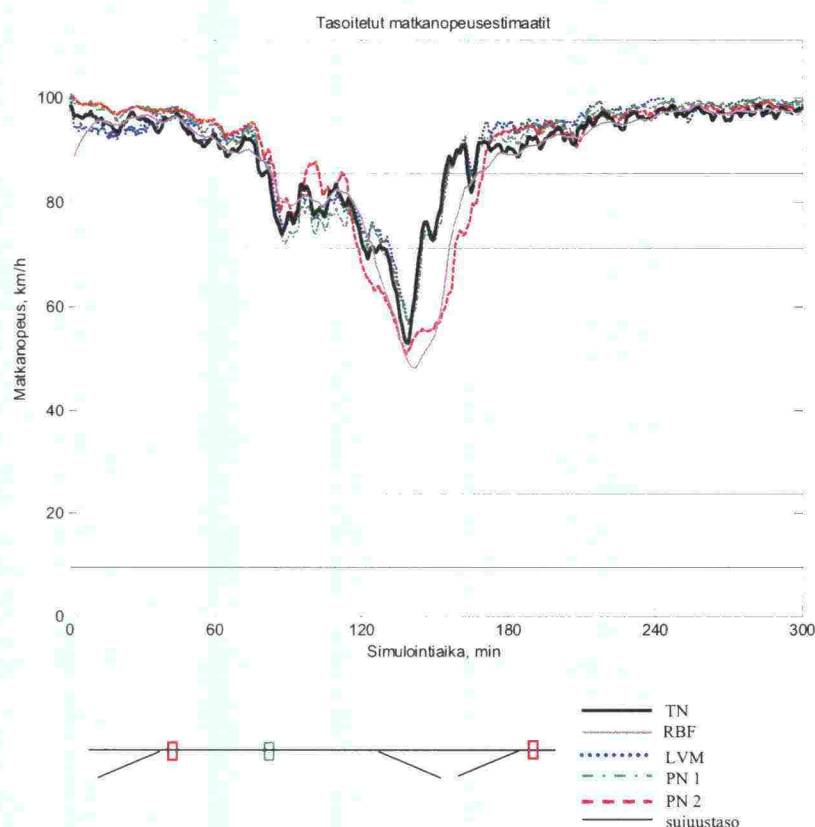
kahden mittauspisteen menetelmä yliarvioi nopeutta ennen ruuhkaa. Liikennetilanne liittymissä on ollut linkin keskiosia sujuvampaa.

Kesäliikenteen iltaruuhkassa matkanopeus ei juurikaan alentunut. Neuroverkkojen antama tulos seuraili simuloinnissa toteutunutta matkanopeutta tarkasti. Neuroverkko 2 tuotti hieman paremmat tulokset kuin neuroverkko 1.



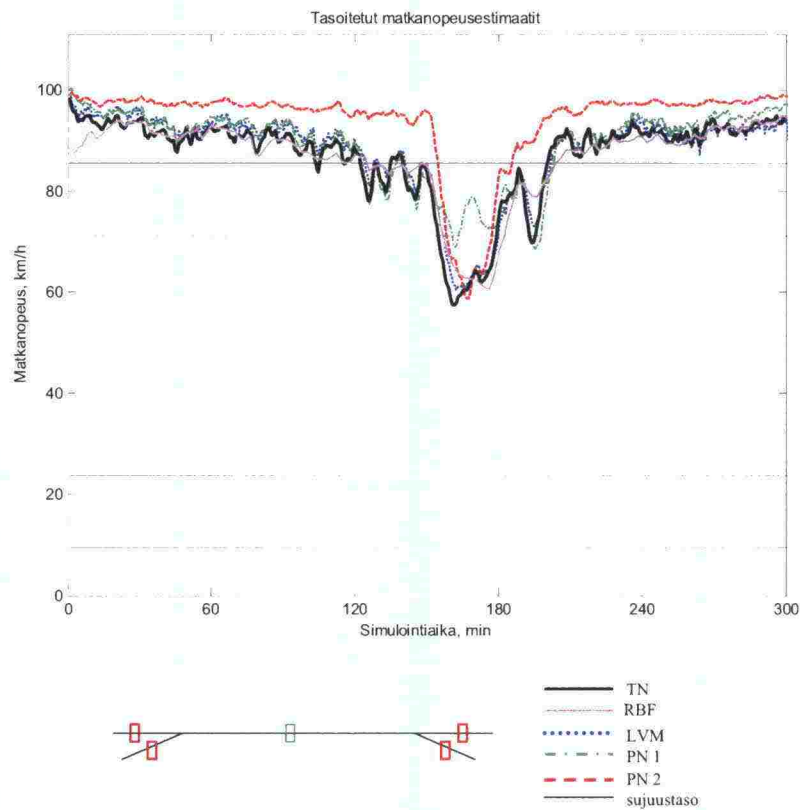
Kuva 71. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, neuroverkko 1.

SIMULOINTITULOKSET



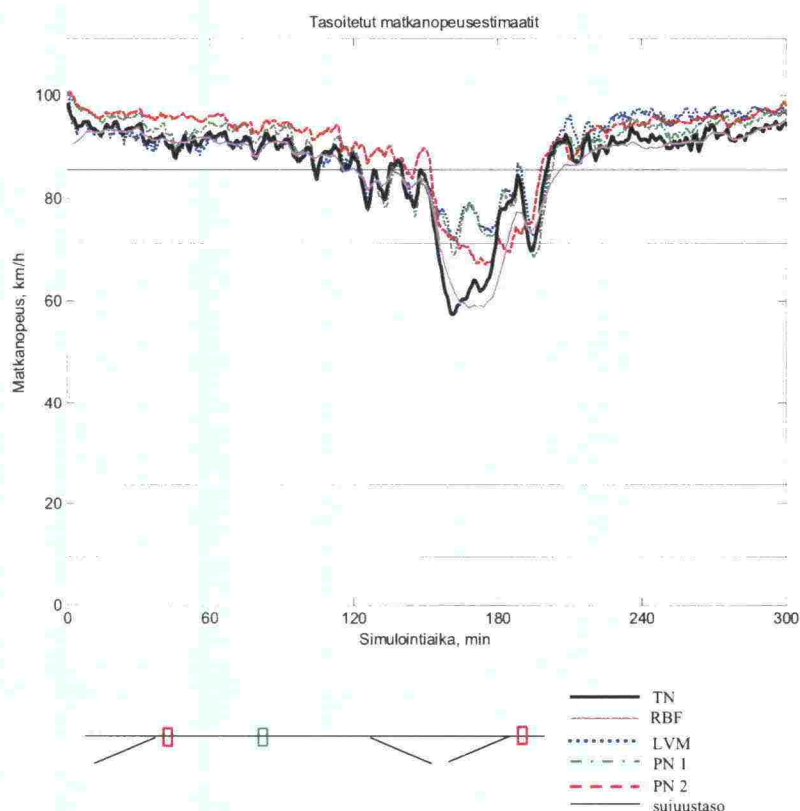
Kuva 72. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, neuroverkko 2.

Seuraavaksi neuroverkkoja tarkasteltiin, kun ensimmäiseltä rampilta linkille tuleva liikennemäärä vaihteli ollen 10–60 % pääsuunnan liikennemäärästä, joka pysyi vakiona. Tulokset on esitetty kuvissa 73 ja 74. Neuroverkot pärjäävät varsin hyvin, etenkin neuroverkko 2. Jälleen kahden mittauspisteen menetelmä vaihtelee enemmän ilmaisinsijoittelulla 1 kuin ilmaisinsijoittelulla 2. Ilmaisinsijoittelulla 1 saadaan parempi tulos ruuhkassa, mutta ilmaisinsijoittelulla 2 vapaassa liikennetilanteessa.



Kuva 73. Matkanopeusestimaatit, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee ollen 10–60 % pääsuunnan liikenteestä, neuroverkko 1.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 74. Matkanopeusestimaatit, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee ollen 10–60 % pääsuunnan liikenteestä, neuroverkko 2.

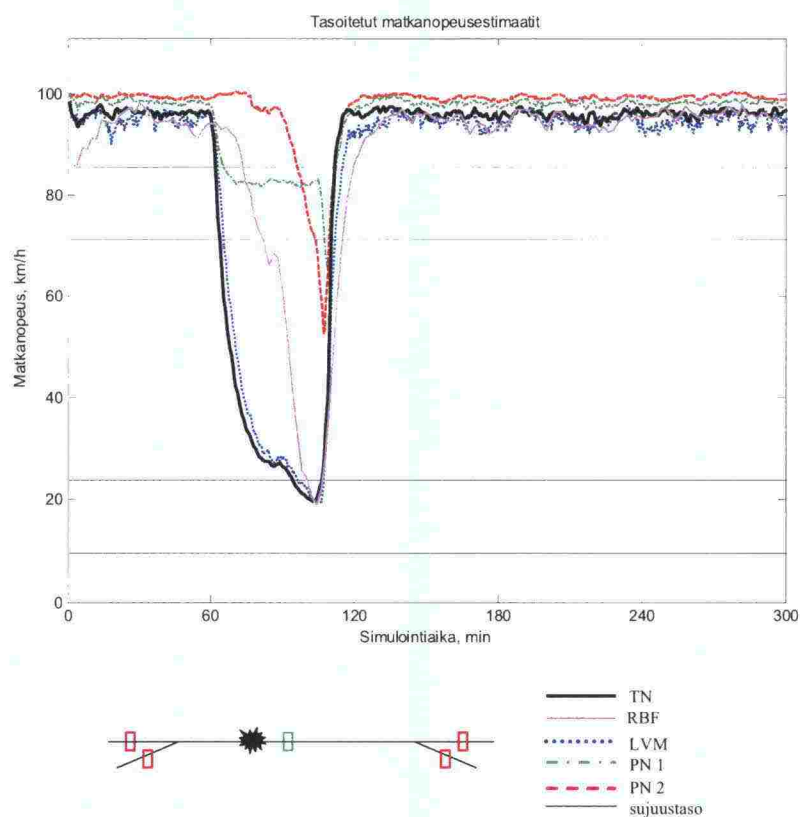
5.3.2 Häiriötilanteet

Seuraavaksi neuroverkkoja tarkasteltiin häiriötilanteissa. Oletuksena oli, ettei neuroverkko pärjää häiriötilanteissa yhtä hyvin kuin ylikysynnästä johtuvissa ruuhkatilanteissa, vaikka opetusdataan kuuluikin häiriötilanteita. Pistemittauksen tulokset häiriötilanteessa riippuvat kuitenkin hyvin voimakkaasti häiriön sijainnista pistemittausasemiin nähden ja tästä syystä pistemittaushavainnot voivat olla samankaltaisissakin häiriötilanteissa erilaisia.

Ensin tarkasteltiin tilannetta, jossa häiriö sijaitsi linkillä ennen matka-aikamittauspistettä (ks. kuva 30), jolloin matka-aikasyöte ei juurikaan reagoi häiriöön, vaan on lähellä vapaan virran matka-aikaa. Kuvasta 75 nähdään ensimmäisen neuroverkon tulos. Neuroverkon matkanopeusestimaatti alkaa pudota vasta, kun häiriötä on kestänyt noin 15 minuuttia. Tätä ennen häiriö ja matkanopeuden aleneminen ei ole näkynyt neuroverkon syötteissä (pistetiedot ja matka-aikamittaus), eikä neuroverkko voi antaa oikeaa tulosta. Neuroverkko reagoi kuitenkin kahden mittauspisteen menetelmää nopeammin, mikä tarkoittaa sitä, että jokin muu lähtötieto, kuten esimerkiksi varausaste, on osoittanut ruuhkautumisen merkkejä pistenopeutta nopeammin. Yksi mahdollinen neuroverkon tulokseen vaikuttanut lähtötieto on se, että häiriön aikana liikennemäärä linkin lopussa on pienempi kuin linkin alussa. Neuroverkko osaa tulkita tämän merkiksi linkin matkanopeuden laskusta. Neuro-

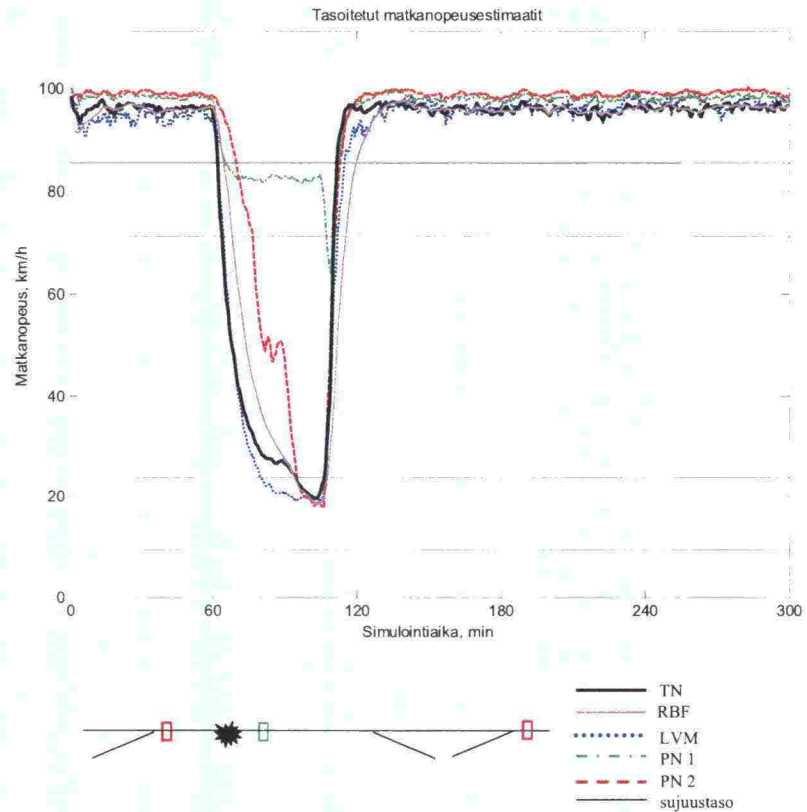
verkon päättelyä vaikeuttaa kuitenkin se, että verkko saa ristiriitaista lähtötietoa, koska matka-aikamittaus ei ole koholla. Liikennevirtamalli antaa tässä tapauksessa parhaan matkanopeusestimaatin.

Kuvasta 76 nähdään toisen neuroverkon toiminta. Nyt ylävirran ilmaisin on lähempänä häiriötä, eli häiriön vaikutus havaitaan nopeammin, mikä näkyy neuroverkon lähes täydellisesti onnistuneena matkanopeusestimaattina.



Kuva 75. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa. Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevaa matka-aikamittauspistettä, neuroverkko 1.

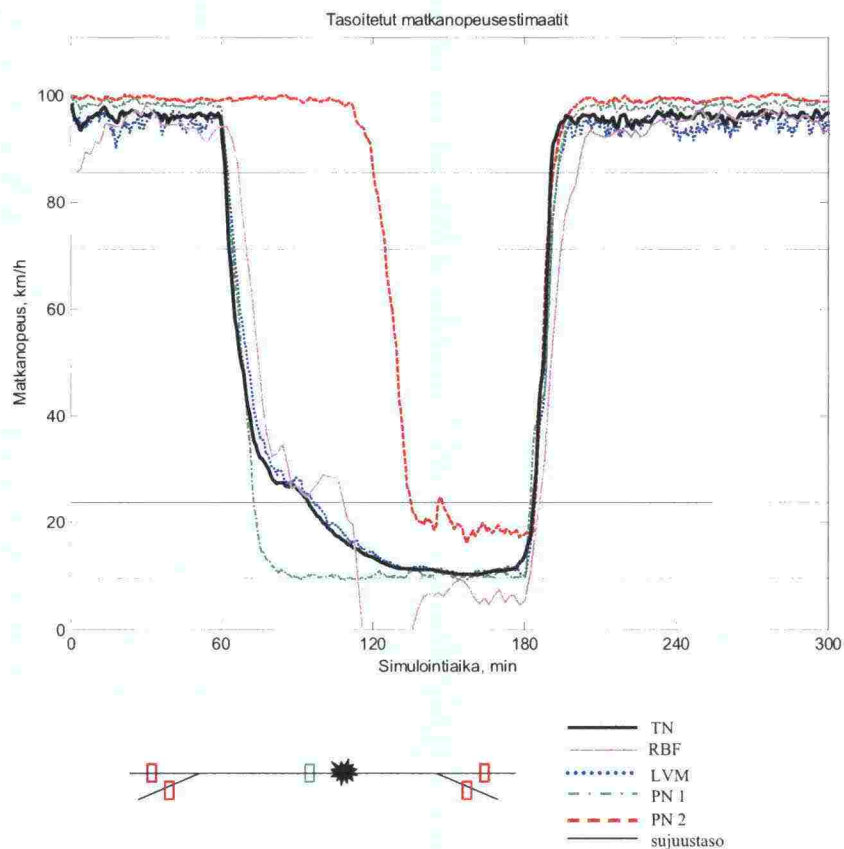
SIMULOINTITULOKSET



Kuva 76. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa. Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevaa matka-aikamittauspistettä, neuroverkko 2.

Seuraavaksi tutkittiin häiriötilannetta, kun häiriö sijaitsee linkin keskellä olevan matka-aikamittauspisteen jälkeen (ks. kuva 30). Tällöin matka-aikamittaus reagoi häiriöön, mutta häiriön näkyminen pistemittautiedoissa viivästyy. Häiriön kestoksi valittiin tässä tapauksessa kaksi tuntia.

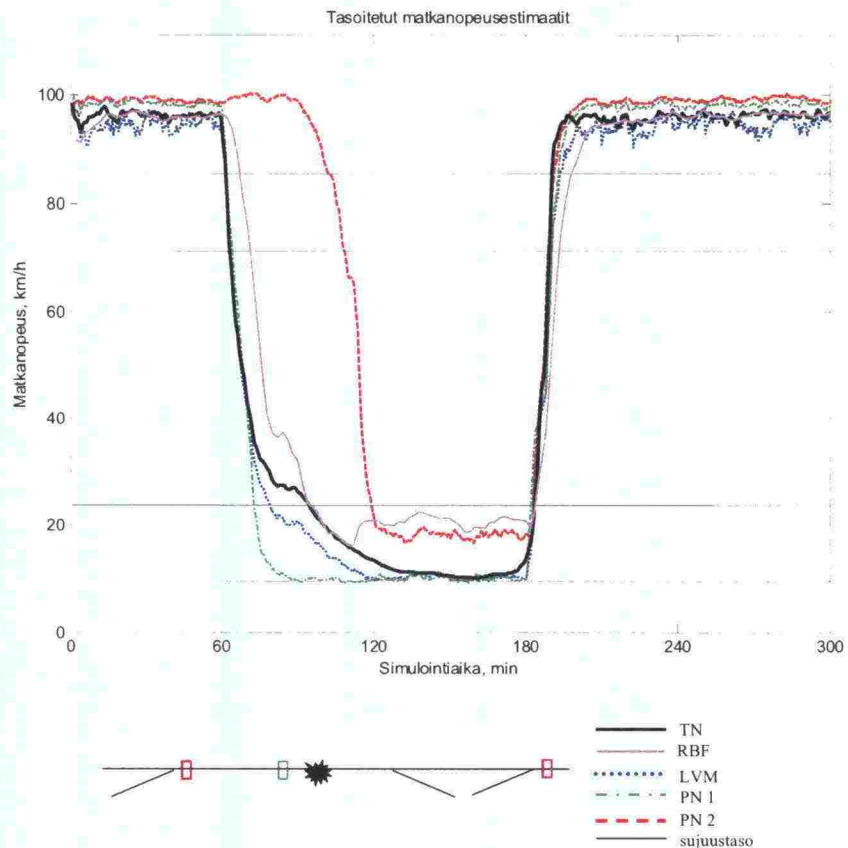
Neuroverkko 1 reagoi häiriöön kohtuullisen nopeasti (kuva 77), mutta häiriön aikana estimoitu nopeustaso heilahtelee. Matkanopeusestimaatti saa jopa negatiivisia arvoja (neuroverkon antamaa tulosta ei rajoitettu). Tämä viittaa siihen, että kyseisen häiriötilanteen syötevektori on opetusavaruuden ulkopuolelta. Neuroverkko pystyy interpoloimaan syöteinä saamiensa arvojen väliltä, mutta ekstrapolointi ei onnistu.



Kuva 77. Matkanopeusestimaatit 2 h häiriötilanteessa. Häiriön sijainti linkin keskellä olevan matka-aikakameran jälkeen, neuroverkko1.

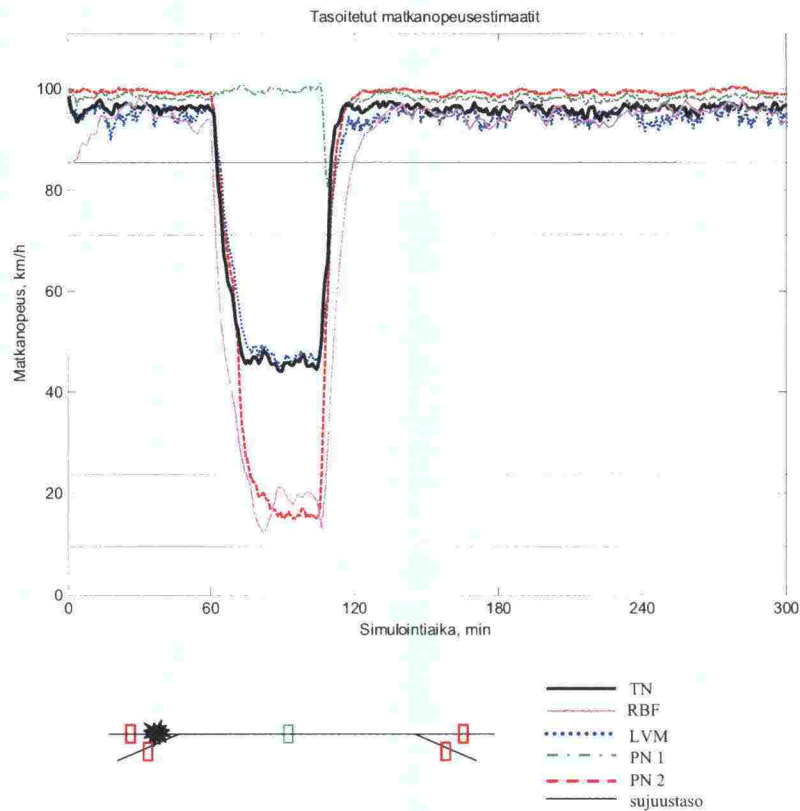
Neuroverkko 2 (kuva 78) antaa paremman tuloksen kuin neuroverkko 1. Neuroverkko reagoi häiriön alkuun nopeasti, mutta estimoitu nopeustaso häiriötilanteen loppupuolella sisältää systemaattisen, noin 10 km/h suuruisen virheen. Neuroverkon 2 antama parempi tulos johtunee jälleen siitä, että ilmaisimet ovat lähempänä häiriötä eli häiriön vaikutus havaitaan pistemittauksissa neuroverkkoa 1 paremmin.

SIMULOINTITULOKSET



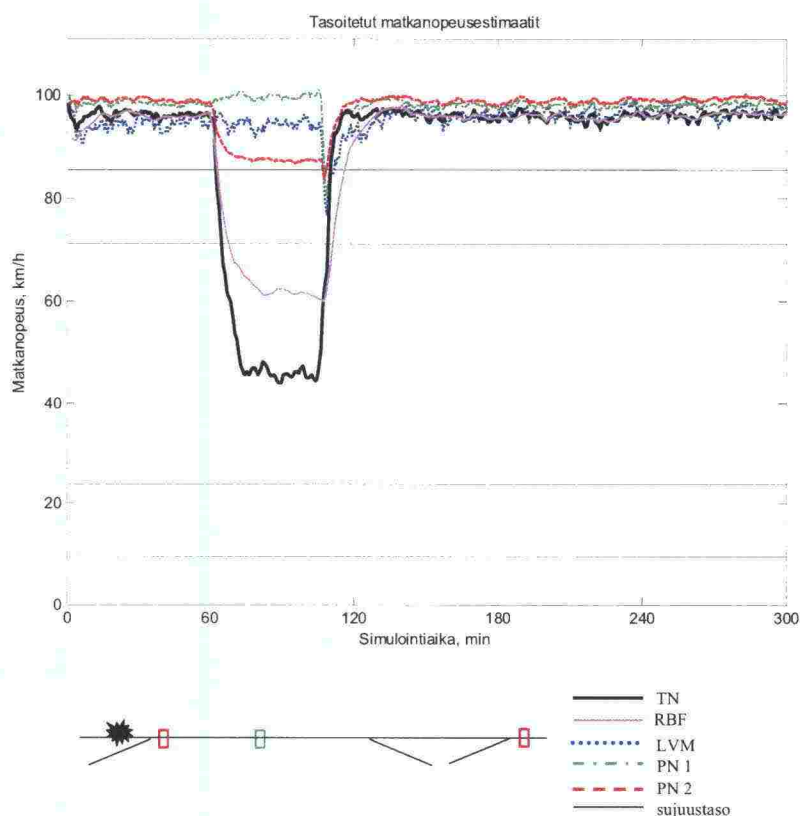
Kuva 78. Matkanopeusestimaatit 2 h häiriötilanteessa. Häiriön sijainti linkin keskellä olevan matka-aikakameran jälkeen, neuroverkko 2.

Suurimmat virheet neuroverkot antavat häiriötilanteissa, joissa häiriö sijaitsee joko linkin aloittavassa tai lopettavassa liittymässä. Opetusdatassa ei tällaisia tilanteita ollut, joten neuroverkkojen on vaikea yleistää oppimaansa. Kun häiriö on linkin aloittavassa liittymässä, neuroverkko 1 aliarvioi matkanopeutta, koska pistemittaus tiedot linkin alussa näyttävät kovin ruuhkautuneilta (kuva 79). Neuroverkko 2 puolestaan yliarvioi matkanopeutta, koska häiriöstä alavirtaan sijaitseva pistemittausasema havaitsee häiriön vain pienenä nopeuden ja varausasteen sekä liikennemäärän alenemana (kuva 80). Matka-aikamittauksaan ei reagoi häiriöön, kun se sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä. Neuroverkko antaa kuitenkin kahden mittauspisteen menetelmää paremman tuloksen, mikä viittaa jälleen siihen, että häiriö on näkynyt lähtötiedoissa muutenkin kuin pistenopeuden alenemana.



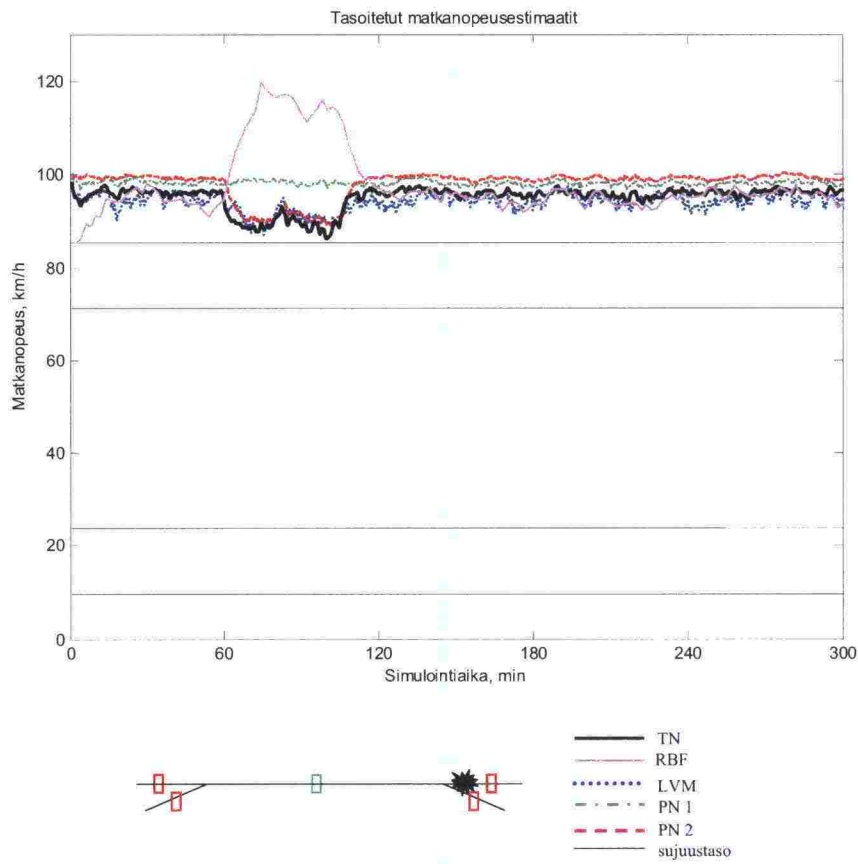
Kuva 79. Matkanopeusestimaatit 45 h häiriötilanteessa, kun häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä, neuroverkko 1.

SIMULOINTITULOKSET



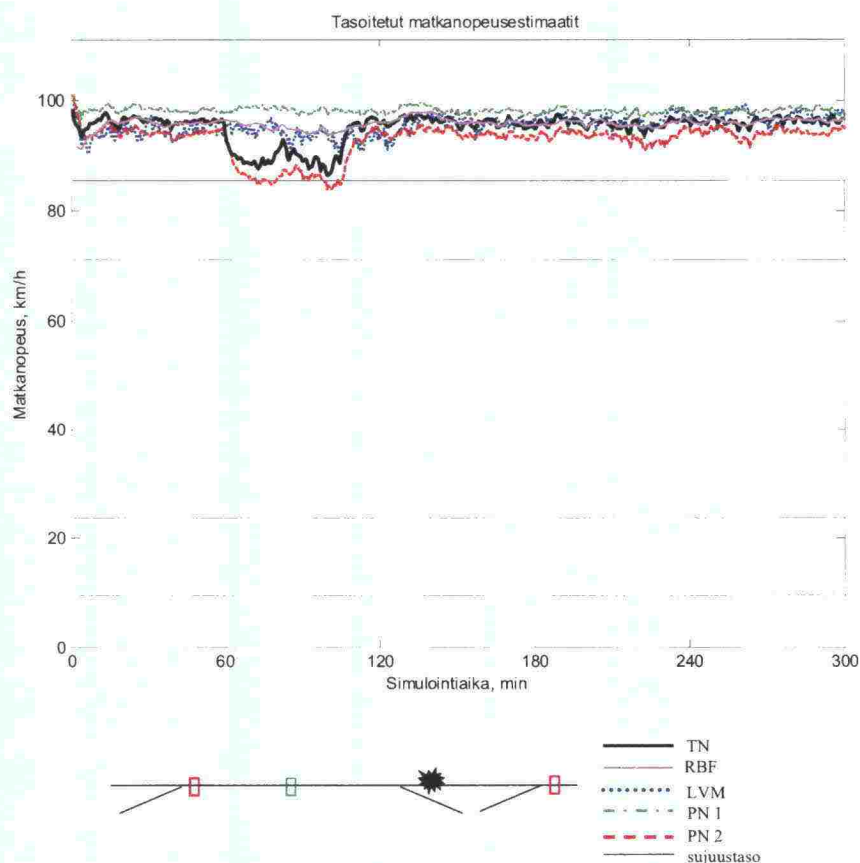
Kuva 80. Matkanopeusestimaatit 45 h häiriötilanteessa, kun häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä, neuroverkko 2.

Kun häiriö on linkin päättävässä liittymässä, neuroverkko 1 antaa matkanopeudeksi häiriön aikana noin 120 km/h (kuva 81). Tämä viittaa jälleen siihen, että syöte on opetusavaruuden ulkopuolelta, jolloin neuroverkon yleistyskyky on heikko. Neuroverkon 2 antama nopeus on kuitenkin järkevällä tasolla, vaikkakaan ei täysin oikea (kuva 82).



Kuva 81. Matkanopeusestimaatit 45 h häiriötilanteessa, kun häiriö sijaitsee linkin päättävässä liittymässä, neuroverkko 1.

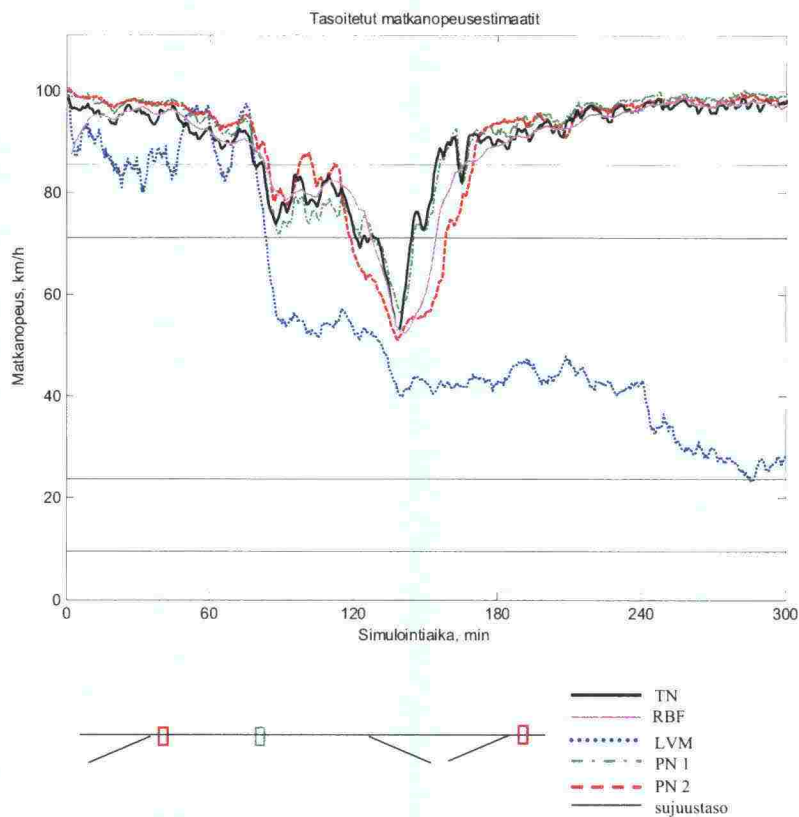
SIMULOINTITULOKSET



Kuva 82. Matkanopeusestimaatit 45 h häiriötilanteessa, kun häiriö sijaitsee linkin aloittavassa liittymässä, neuroverkko 2.

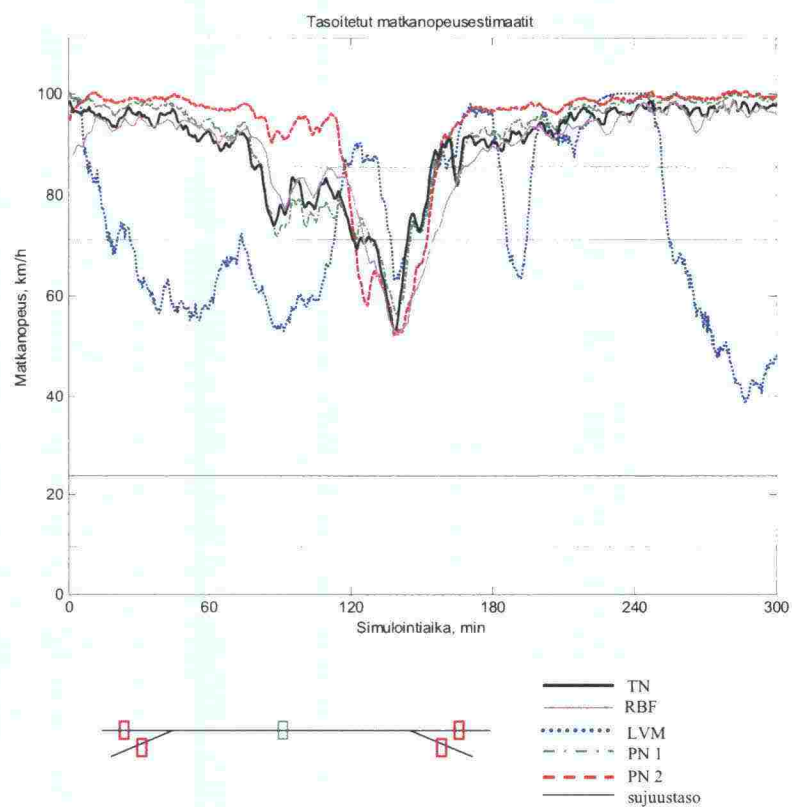
5.3.3 Ilmaisinvirheet

Neuroverkkojen herkkyyttä ilmaisinvirheille tutkittiin useilla erilaisilla virheprosentteilla käyttämällä simulointiajoa "iltaruuhka 2". Neuroverkon opetus tehtiin virheettömillä mittaustiedoilla ja testaamiseen käytettiin tietoja, joista oli poistettu tietty osuus havainnoista. Huomattiin, etteivät neuroverkot ole herkkiä suurillekaan satunnaisille ilmaisinvirheille. Tämä on luonnollista, koska piste- ja matkanopeusmittaus antaa hyviä tuloksia, vaikka osa ajoneuvoista jäisi havaitsematta. Liikennemäärä- ja varausastemittauksessa havaitsematta jääneet ajoneuvot aiheuttavat suuremman virheen, mutta virhe ei kuitenkaan kumuloidu vastaavaan tapaan kuin liikennevirtamallissa. Neuroverkot antoivat varsin hyviä tuloksia jopa 15 %:n ilmaisinvirheillä. Kuvassa 83 on esitetty neuroverkon 2 tuottama nopeusestimaatti, kun kaikissa ilmaisimissa oli 5 %:n virhe. Kuvassa 84 on puolestaan neuroverkon 1 tuottama estimaatti, kun kaikissa ilmaisimissa oli 15 %:n virhe. Huomataan, että liikennevirtamalli (ilman korjausta) antaa näin suurilla virheprosentteilla hyvin virheellisiä tuloksia. Kuvassa 85 on esitetty neuroverkon 1 tilanne, kun linkin alussa olevissa ilmaisimissa oli 5 %:n ja linkin lopussa olevissa ilmaisimissa 15 %:n virhe. Erisuuri virheprosentti eri ilmaisimissa ei vaikuttanut neuroverkon estimaatin onnistumiseen, mutta liikennevirtamallin estimaatti (ilman korjausta) on erittäin virheellinen.

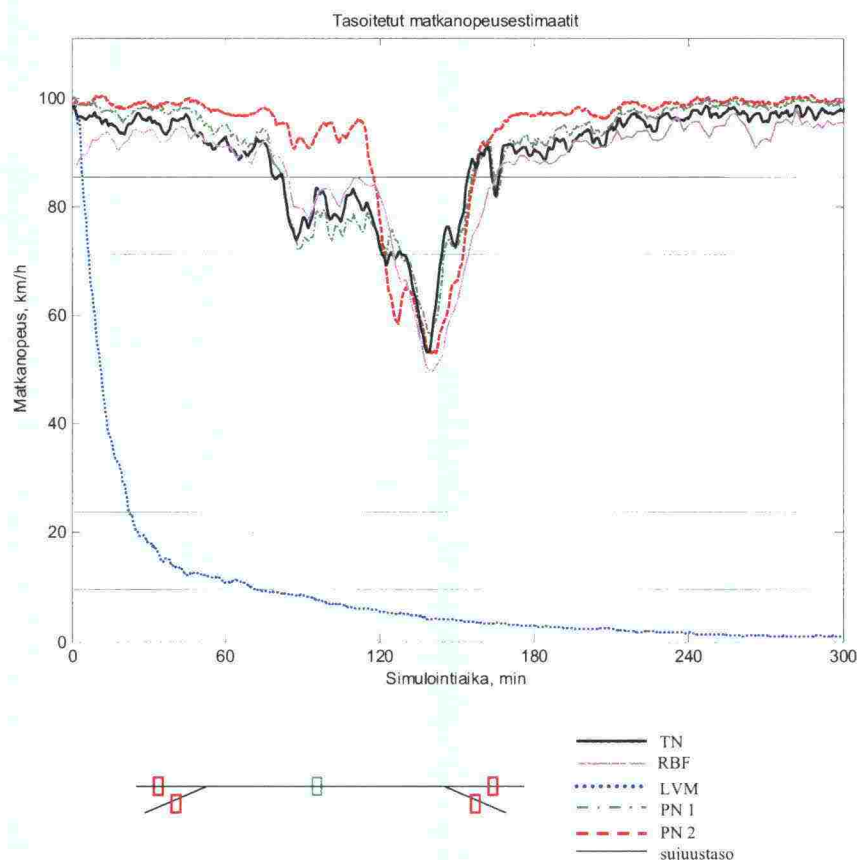


Kuva 83. Matkanopeusestimaatit (neuroverkko 2), kun ilmaisinvirhe kaikissa ilmaisimissa oli 5 %

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 84. Matkanopeusestimaatit (neuroverkko 1), kun ilmaisinvirhe kaikissa ilmaisimissa oli 15 %.



Kuva 85. Matkanopeusestimaatit (neuroverkko 1), kun ilmaisinvirhe ensimmäisen linkin alussa olevissa ilmaisimissa oli 5 % ja linkin lopussa 15 %.

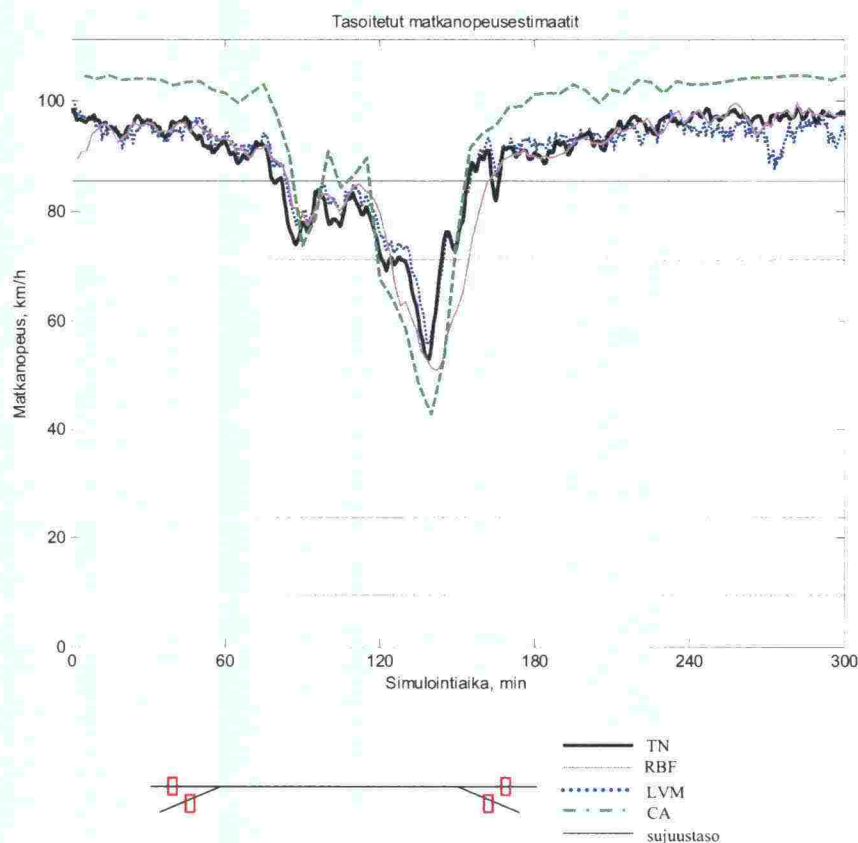
Yhteenveto neuroverkoilla ja liikennevirtamallilla tarkasteltujen tapauksen simulointituloksista on esitetty liitteessä 4.

5.4 Tulosten vertailu soluautomaattimalliin

Teknillisen korkeakoulun Fysiikan laboratoriossa on tutkittu liikenteen mallintamista soluautomaattimallien (cellular automaton, ca) avulla. Tämän työn yhteydessä soluautomaateilla toteutettiin simuloiteja samoilla koeasetelmilla, joita käytettiin liikennevirtamallin ja neuroverkkojen tutkimiseen. Näin menetelmien tuottamia matkanopeusestimaatteja voidaan verrata myös soluautomaattimallinnuksen tuottamiin estimaatteihin. Soluautomaattimallit toteutti TkL Arto Hämäläinen, jonka haastatteluun seuraavassa esitetyt tiedot perustuvat.

Soluautomaattien tulokset ovat vielä alustavia ja niitä parannetaan mm. muokkaamalla soluautomaattimallin parametrejä. Kuvassa 86 on kuitenkin esitetty alustava tulos iltaruuhka 2 -tapauksesta.

SIMULOINTITULOKSET



Kuva 86. Liikennevirtamallin, neuroverkkojen (neuroverkko 1) ja soluautomaattimallin antamat matkanopeusestimaatit. Alustava tulos.

Huomataan, että soluautomaattimallin tulos toistaa matkanopeusprofiilin muodon, mutta estimaatti on lähes koko ajan joko todellista matkanopeutta suurempi tai pienempi. Soluautomaatin mallinnustapa on Hutsimia yksinkertaisempi, mikä vaikuttaa soluautomaatin kykyyn kuvata liikennettä.

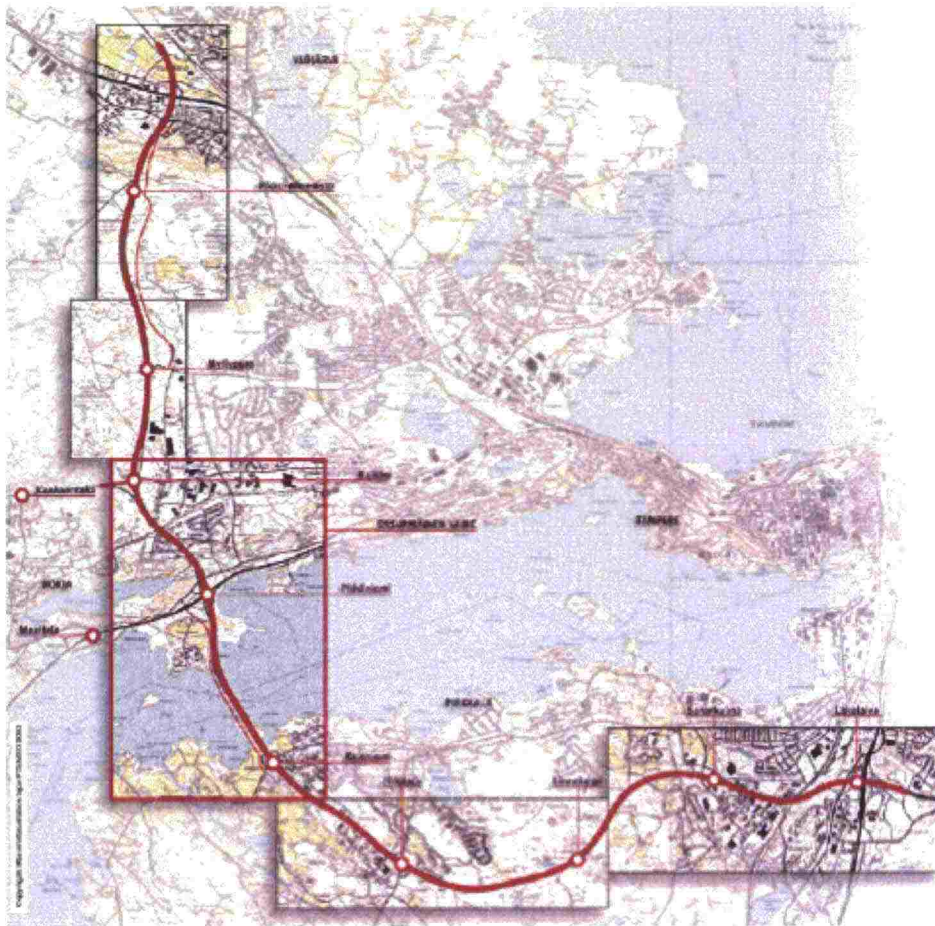
Kuvasta 86 huomataan, että soluautomaattimallissa vapaa nopeus on ollut yli 100 km/h. Tämä johtuu siitä, että soluautomaattimallissa kaikilla ajoneuvoilla on sama tavoitenopeus, jonka määrittämiseen vaikuttavat solun pituus ja aika-askeleen pituus sekä jarrutusparametri, jolla pyritään tuottamaan liikennevirtaan todellisuutta kuvaavaa satunnaisuutta. Jarrutusparametri kertoo todennäköisyyden, jolla ajoneuvon nopeutta pienennetään jokaisessa aika-askeleessa. Käytetyssä mallissa solun pituus oli 5 m ja ajoneuvot saivat edetä maksimissaan kuusi solua yhdessä aika-askeleessa. Mallin aika-askel oli 1 sekunti. Tämä tarkoittaa sitä, että nopeusportaat mallissa olivat 18 km/h suuruisia ja maksiminopeus oli 108 km/h.

6 MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

6.1 Tiejakson ominaisuudet

Valtatie 3 Helsinki–Tampere–Vaasa on yksi Suomen tärkeimmistä pääteistä. Tampereen länsipuolella kulkeva 21 kilometriä pitkä tieosuus Kuljun moottoritieiltä Ylöjärvelle muodostaa kehätien, joka on nykyisin välillä Lakalaiva–Rajaniemi moottoriliikennetietä ja välillä Rajaniemi–Ylöjärvi tavallista kaksiajokaistaista valtatietä. Tieosuus kärsii nykyisellään huonosta toimivuudesta. Ruuhkat ovat päivittäisiä, koska liikennemäärät ovat tien kapasiteettiin nähden suuret (9000–26 000 ajon/vrk). Lisäksi tien onnettomuustiheys on suuri. (Hämeen tiepiiri 2003.)

Tampereen läntinen kehätie täydennetään moottoritieksi rakentamalla toinen ajorata nykyisen viereen. Nykyiset eritasoliittymät täydennetään moottoritietason vaatimusten mukaisiksi. Tie on luonteeltaan kaupunkimoottoritie, jossa on runsaasti maankäyttöä palvelevia liityntäliittymiä. Vuoden 2020 liikennemääräksi on ennustettu 14 000–40 000 ajon/vrk. Koko tieosuuden on tarkoitus olla valmis vuonna 2008. Yleiskartta tieosuudesta on esitetty kuvassa 87. (Hämeen tiepiiri 2003.)



Kuva 87. Tampereen läntinen kehätie (Hämeen tiepiiri 2003).

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa (VALTALIISE) (Tiehallinto 2002) on esitetty, että Tampereen läntinen kehätie (yhteysväli 303) kuuluu liikenteen seurannan korkeimpaan laatuluokkaan ja LAM-piste on esitetty sijoitettavaksi tiejakson jokaiselle liittymävälille. Tässä tarkastellaan Tampereen läntisen kehätien liikenteen seurannan laitemääriä ja kustannuksia, kun liikennetilanteen arvioimiseen käytetään työssä tutkittuja menetelmiä eli yksinkertaista liikennevirtamallia ja neuroverkkoja. Laitemääriä ja kustannuksia verrataan Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa esitettyjen seurantalaitteiden määrään ja kustannuksiin.

6.2 Laitteet ja kustannukset eri seurantavaihtoehdoilla

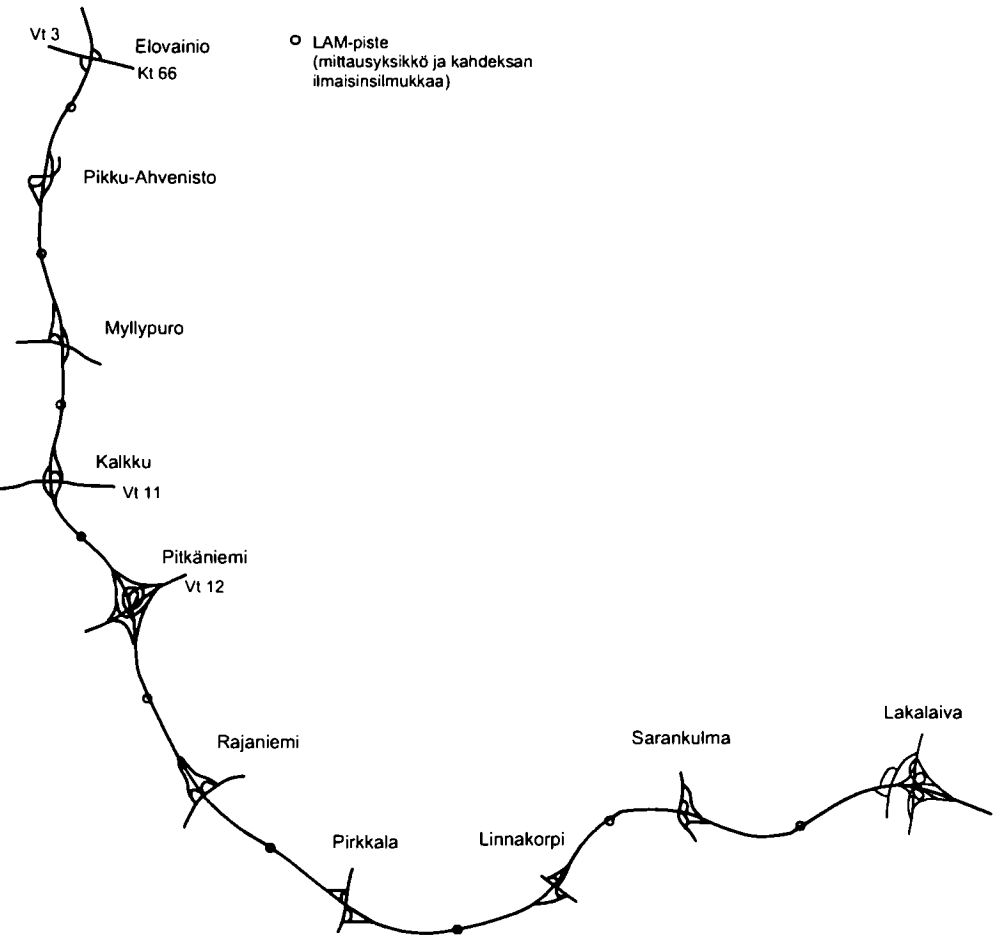
Liikenteen seurantalaitteiden yksikköhintoina laskelmissa käytetään samoja hintoja, joilla kustannukset laskettiin Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa. Yksikköhinnat on esitetty *taulukossa 12*.

Taulukko 12. Kustannuslaskelmissa käytetyt liikenteen seurantalaitteiden yksikköhinnat.

	Investointikustannus €	Ylläpitokustannus €/vuosi
PISTEMITTAUSASEMA		
LAM-piste		*)
mittausyksikkö	5500	330
ilmaisinsilmukka	500	30
*) keskimäärin 6 % silmukoista uusitaan vuosittain		
TIEOSAMITTAUSASEMA		
IR-kamera + rekisterikilpien tunnistus (2+2 kaistaa) (sis. mittausyksikkö)	42000	2500
SÄHKÖNSYÖTTÖ		
Kaapelointi+liittyminen verkkoon (kesk. 100 m kaapelointipituus, hinta 15 €/m)	2000	170
Kaapeli	4 €/m	
TIETOLIIKENNE		
ADSL liittymämaksu	500	720
Tietoliikennekaapelointikustannukset (kesk. 200 m kaapelointi läh. puhelinkeskukselta)	3000	
Tietoliikennekaapeli	2 €/m	

Kuvassa 88 on esitetty liikenteen seurantalaitteiden sijainti Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa esitetyn tavoitetilan mukaan. Jokaisella liittymävälillä on yksi LAM-piste. *Taulukoissa 13 ja 14* on esitetty seurantalaitteiden, sähkönsyöttöpisteiden ja tietoliikennepisteiden määrä ja niiden investointi- sekä ylläpitokustannukset. Seurantajärjestelmän yhteenlasketut investointikustannukset ovat noin 135 000 € ja ylläpitokustannukset noin 15 100 €/vuosi.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE



Kuva 88. Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa esitetty ilmaisinsijoittelu.

Taulukko 13. Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa esitetyn ilmaisinsijoittelun laitemäärät.

Liittymäväli	LAITTEET		Sähkösyyttö *)	Tietoliikenne
	LAM-piste mittausyksikkö	ilmaisinsilmukka		
Elovainio - Pikku-Ahvenisto	1	8	1	1
Pikku-Ahvenisto - Myllypuro	1	8	1	1
Myllypuro - Kalkku	1	8	1	1
Kalkku - Pitkäniemi	1	8	1	1
Pitkäniemi - Rajaniemi	1	8	1	1
Rajaniemi - Pirkkala	1	8	1	1
Pirkkala - Linnakorpi	1	8	1	1
Linnakorpi - Sarankulma	1	8	1	1
Sarankulma - Lakalaiva	1	8	1	1
Yhteensä	9	72	9	9

*) Oletetaan, että sähkö otetaan yleisestä verkosta omalla liittymällä eikä tievalaistuskeseuksen kautta

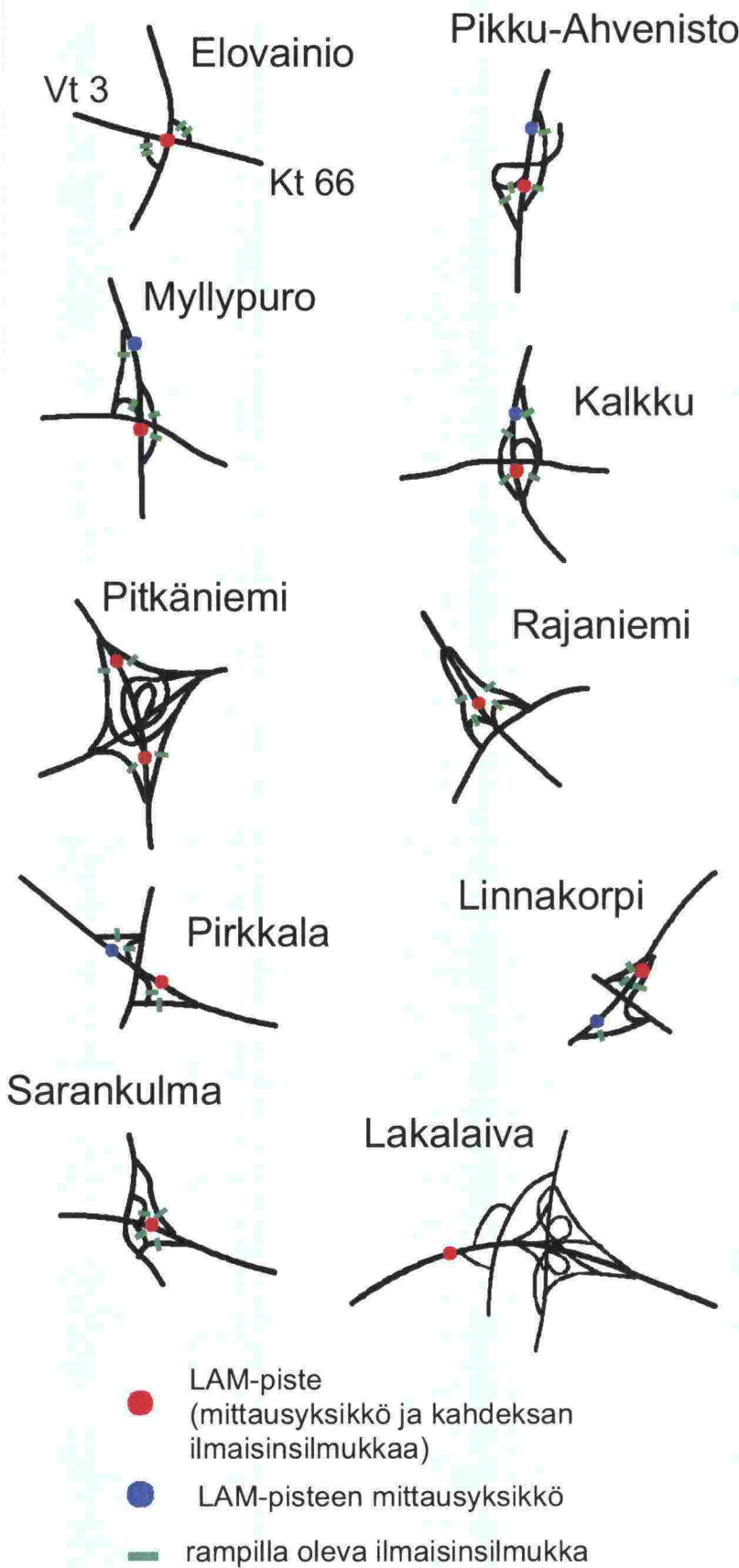
MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

Taulukko 14. Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa esitetyn ilmaisinsijoittelun investointi- ja ylläpitokustannukset.

Liittymäväli	KUSTANNUKSET, €							
	LAM-piste		ilmaisinsilmukka		Sähkönsyöttö		Tietoliikenne	
	mittausyksikkö	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito
Elovainio - Pikku-Ahvenisto	5500	330	4000	240	2000	170	3500	720
Pikku-Ahvenisto - Myllypuro	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Myllypuro - Kalkku	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Kalkku - Pitkäniemi	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Pitkäniemi - Rajaniemi	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Rajaniemi - Pirkkala	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Pirkkala - Linnakorpi	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Linnakorpi - Sarankulma	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Sarankulma - Lakalaiva	5500	570	4000	240	2000	170	3500	720
Yhteensä	49500	4890	36000	2160	18000	1530	31500	6480

Investointi	135 000
Ylläpito	15 100

Kuvassa 89 on esitetty liikenteen seurantalaitteiden sijainti käytettäessä liikennevirtamallia ilmaisinsijoittelulla 1. Pistemittauksen ilmaisimet sijaitsevat päätiellä liittymän keskellä ja kaikilla rampeilla. Taulukoissa 15 ja 16 on esitetty seurantalaitteiden, sähkönsyöttöpisteiden ja tietoliikennepisteiden määrä ja niiden investointi- sekä ylläpitokustannukset. Seurantajärjestelmän yhteenlasketut investointikustannukset ovat noin 217 000 € ja ylläpitokustannukset noin 17 900 €/vuosi.



Kuva 89. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoittelu (vaihtoehto 1).

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

Taulukko 15. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 1 laitemäärät.

Liittymä	LAITTEET		Sähkönsyöttö *)	Sähkökaapeli m	Tietoliikenne **)	Tietoliikennekaapeli m
	LAM-piste mittausyksikkö	ilmaisinsilmukka				
Elovainio	1	12	1		1	
Pikku-Ahvenisto	2	12	1	300	1	300
Mylypuro	2	12	1	250	1	250
Kalkku	2	12	1	400	1	400
Pitkäniemi	2	20	1	500	1	500
Rajaniemi	1	12	1		1	
Pirkkala	2	12	1	300	1	300
Linnakorpi	2	12	1	250	1	250
Sarankulma	1	12	1		1	
Lakalaiva	1	8	1		1	
Yhteensä	16	124	10	2000	10	2000

*) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä sähköliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen.

**) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä tietoliikenneliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen.

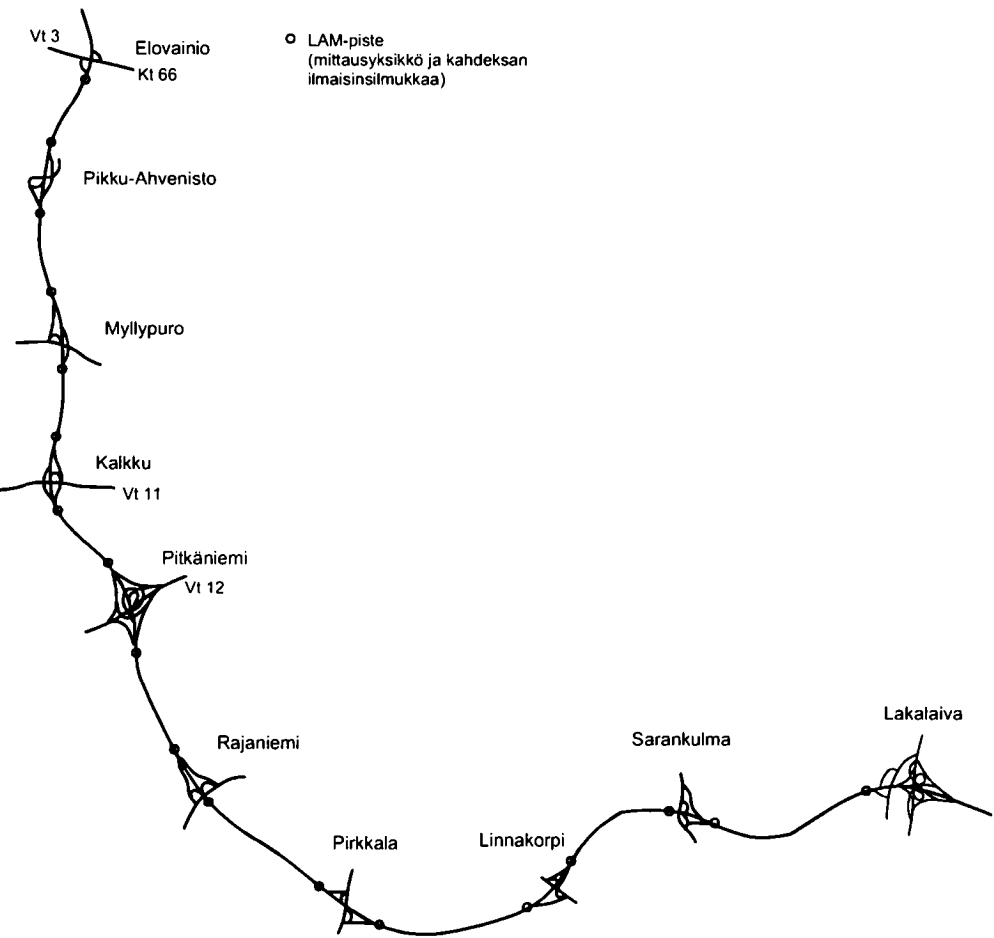
Taulukko 16. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 1 investointi- ja ylläpitokustannukset.

Liittymä	KUSTANNUKSET, €							
	LAM-piste		ilmaisinsilmukka	investointi	ylläpito	Sähkönsyöttö		Tietoliikenne
	investointi	ylläpito				investointi	ylläpito	
Elovainio	5500	330	6000	360		2000	170	0
Pikku-Ahvenisto	11000	660	6000	360		2000	170	1200
Mylypuro	11000	660	6000	360		2000	170	1000
Kalkku	11000	660	6000	360		2000	170	1600
Pitkäniemi	11000	660	10000	600		2000	170	2000
Rajaniemi	5500	330	6000	360		2000	170	0
Pirkkala	11000	660	6000	360		2000	170	1200
Linnakorpi	11000	660	6000	360		2000	170	1000
Sarankulma	5500	330	6000	360		2000	170	0
Lakalaiva	5500	330	4000	240		2000	170	0
Yhteensä	88000	5280	62000	3720		20000	1700	8000

Investointi	217 000
Ylläpito	17 900

Kuvassa 90 on esitetty liikenteen seurantalaitteiden sijainti käytettäessä liikennevirtamallia ilmaisinsijoittelulla 2. Pistemittauksen ilmaisimet sijaitsevat päätiellä jokaisen liittymisrampin jälkeen ja ennen jokaista poistumisramppia. Taulukoissa 17 ja 18 on esitetty seurantalaitteiden, sähkönsyöttöpisteiden ja tietoliikennepisteiden määrä ja niiden investointi- sekä ylläpitokustannukset. Seurantajärjestelmän yhteenlasketut investointikustannukset ovat noin 265 000 € ja ylläpitokustannukset noin 19 200 €/vuosi.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE



Kuva 90. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoittelu (vaihtoehto 2).

Taulukko 17. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 2 laitemäärät.

Liittymä	LAITTEET		Sähkönsyöttö)	Sähkökaapeli m	Tietoliikenne)	Tietoliikennekaapeli m
	LAM-piste mittausyksikkö	ilmaisinsilmukka				
Elovainio	1	8	1		1	
Pikku-Ahvenisto	2	16	1	800	1	800
Myllypuro	2	16	1	800	1	800
Kalkku	2	16	1	900	1	900
Pitkäniemi	2	16	1	900	1	900
Rajaniemi	2	16	1	800	1	800
Pirkkala	2	16	1	850	1	850
Linnakorpi	2	16	1	800	1	800
Sarankulma	2	16	1	600	1	600
Lakalaiva	1	8	1		1	
Yhteensä	18	144	10	6450	10	6450

*) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä sähköliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen.
**) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä tietoliikenneliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

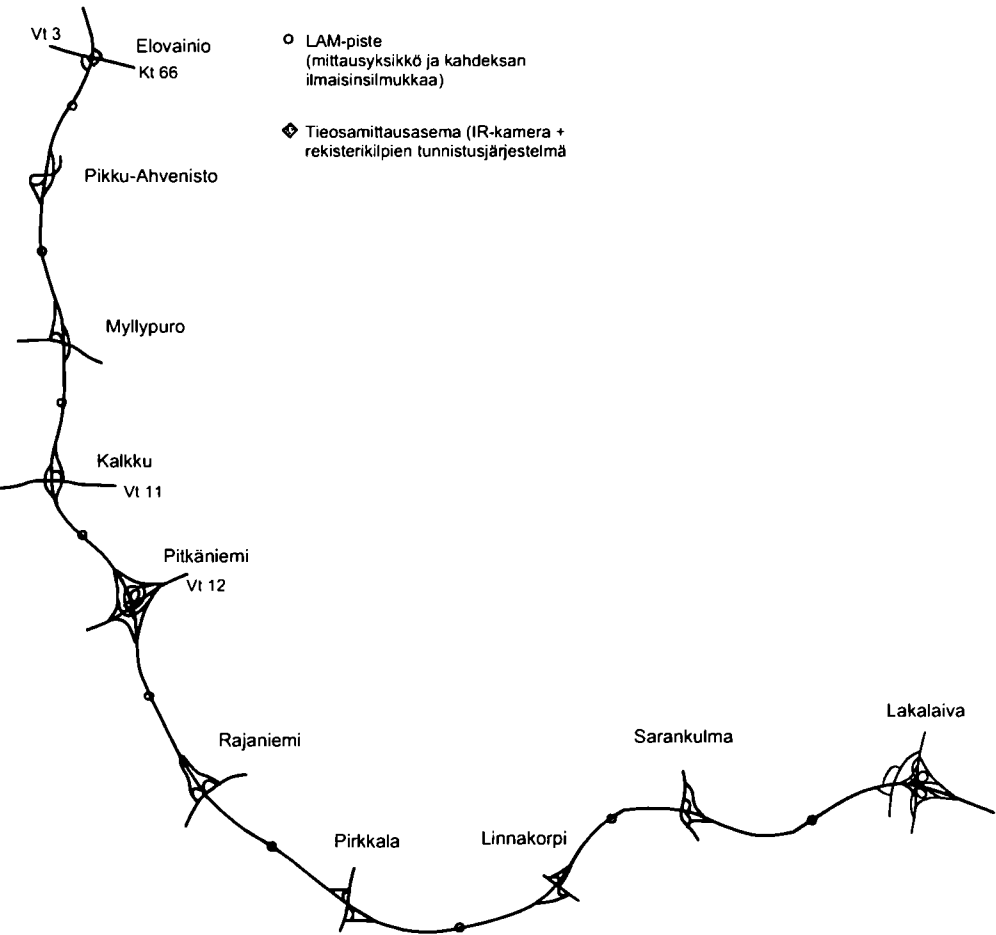
Taulukko 18. Liikennevirtamallin ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 2 investointi- ja ylläpitokustannukset.

Liittymä	KUSTANNUKSET, €									
	LAM-piste mittausyksikkö		ilmaisinsilmukka		Sähkönsyöttö			Tietoliikenne		
	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	kaapeli	investointi	ylläpito	kaapeli
Elovainio	5500	330	4000	240	2000	170	0	3500	720	0
Pikku-Ahvenisto	11000	660	8000	480	2000	170	3200	3500	720	1600
Myllypuro	11000	660	8000	480	2000	170	3200	3500	720	1600
Kalkku	11000	660	8000	480	2000	170	3600	3500	720	1800
Pitkäniemi	11000	660	8000	480	2000	170	3600	3500	720	1800
Rajaniemi	11000	660	8000	480	2000	170	3200	3500	720	1600
Pirkkala	11000	660	8000	480	2000	170	3400	3500	720	1700
Linnakorpi	11000	660	8000	480	2000	170	3200	3500	720	1600
Sarankulma	11000	660	8000	480	2000	170	2400	3500	720	1200
Lakalaiva	5500	330	4000	240	2000	170	0	3500	720	0
Yhteensä	99000	5940	72000	4320	20000	1700	25800	35000	7200	12900

Investointi	265 000
Ylläpito	19 200

Kuvassa 91 on esitetty liikenteen seurantalaitteiden sijainti neuroverkoille ehdotetulla lähtötietovaihtoehdolla 1. LAM-pisteet sijaitsevat jokaisen linkin keskellä. Lisäksi matka-aikoja mitataan väleillä Elovainio–Pitkäniemi ja Pitkäniemi–Lakalaiva. Taulukoissa 19 ja 20 on esitetty seurantalaitteiden, sähkönsyöttöpisteiden ja tietoliikennepisteiden määrä ja niiden investointi- sekä ylläpitokustannukset. Seurantajärjestelmän yhteenlasketut investointikustannukset ovat noin 278 000 € ja ylläpitokustannukset noin 23 300 €/vuosi.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE



Kuva 91. Neuroverkon ilmaisinsijoittelu (vaihtoehto 1).

Taulukko 19. Neuroverkon ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 1 laitemäärät.

LAITTEET					
Liittymä	LAM-piste mittausyksikkö ilmaisinsilmukka		Tieosamittausasema 2+2 kaistaa	Sähkönsyöttö	Tietoliikenne
Elovainio	1	8	1	2	2
Pikku-Ahvenisto	1	8		1	1
Myllypuro	1	8		1	1
Kalkku	1	8		1	1
Pitkäniemi	1	8	1	2	2
Rajaniemi	1	8		1	1
Pirkkala	1	8		1	1
Linnakorpi	1	8		1	1
Sarankulma	1	8		1	1
Lakalaiva			1	1	1
Yhteensä	9	72	3	12	12

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

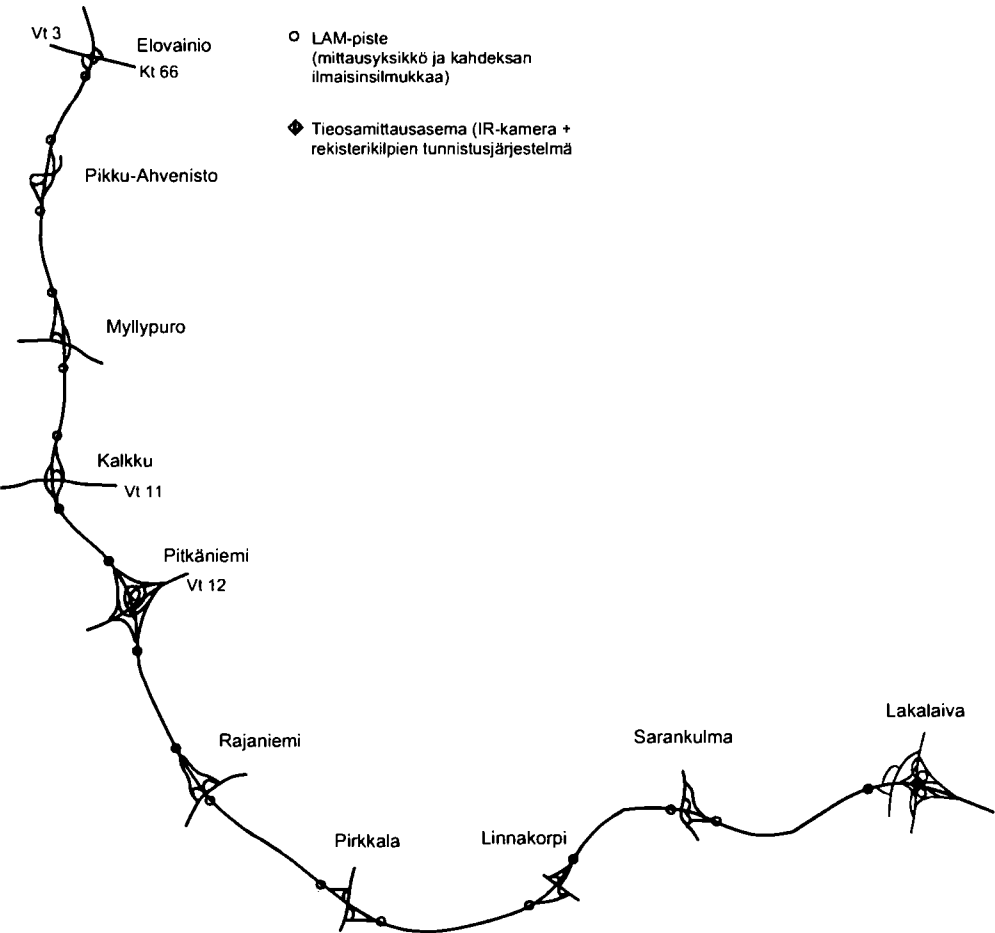
Taulukko 20. Neuroverkon ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 1 investointi- ja ylläpitokustannukset.

Liittymä	KUSTANNUKSET, €				Tieosamittausasema		Sähkönsyöttö		Tietoliikenne	
	LAM-piste		ilmaisinsilmukka		2+2 kaistaa					
	mittausyksikkö	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito
Elovainio	5500	330	4000	240	42000	2500	4000	340	7000	1440
Pikku-Ahvenisto	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Myllypuro	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Kalkku	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Pitkäniemi	5500	330	4000	240	42000	2500	4000	340	7000	1440
Rajaniemi	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Pirkkala	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Linnakorpi	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Sarankulma	5500	330	4000	240	0	0	2000	170	3500	720
Lakalaiva	0	0	0	0	42000	2500	2000	170	3500	720
Yhteensä	49500	2970	36000	2160	126000	7500	24000	2040	42000	8640

Investointi	278 000
Ylläpito	23 300

Kuvassa 92 on esitetty liikenteen seurantalaitteiden sijainti neuroverkoille ehdotetulla lähtötietovaihtoehdolla 2. LAM-pisteet sijaitsevat jokaisen liittymisrampin jälkeen ja ennen jokaista poistumisramppia. Lisäksi matka-aikoja mitataan väleillä Elovainio–Pitkäniemi ja Pitkäniemi–Lakalaiva. Taulukoissa 21 ja 22 on esitetty seurantalaitteiden, sähkönsyöttöpisteiden ja tietoliikennepisteiden määrä ja niiden investointi- sekä ylläpitokustannukset. Seurantajärjestelmän yhteenlasketut investointikustannukset ovat noin 391 000 € ja ylläpitokustannukset noin 26 700 €/vuosi.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE



Kuva 92. Neuroverkon ilmaisinsijoittelu (vaihtoehto 2).

Taulukko 21. Neuroverkon ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 2 laitemäärät.

Liittymä	LAITTEET		Tieosamittausasema 2+2 kaistaa	Sähkönsyöttö)	Sähkökaapeli m	Tietoliikenne **)	Tietoliikennekaapeli m
	LAM-piste mittausyksikkö	ilmaisinsilmukka					
Elovainio	1	8	1	1		1	
Pikku-Ahvenisto	2	16		1	800	1	800
Myllypuro	2	16		1	800	1	800
Kalkku	2	16		1	900	1	900
Pitkäniemi	2	16	1	1	900	1	900
Rajaniemi	2	16		1	800	1	800
Pirkkala	2	16		1	850	1	850
Linnakorpi	2	16		1	800	1	800
Sarankulma	2	16		1	600	1	600
Lakalaiva	1	8	1	1		1	
Yhteensä	18	144	3	10	6450	10	6450

*) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä sähköliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen. Tieosamittauspiste käyttää samaa sähköliittymää kuin LAM-piste.
**) Oletetaan, että saman liittymän alueella olevat mittauspisteet hoidetaan yhdellä tietoliikenneliittymällä kaapeloimalla yksiköt paikallisesti yhteen. Tieosamittauspiste käyttää samaa tietoliikenneliittymää kuin LAM-piste.

MENETELMIEN VAATIMA SEURANTA – ESIMERKKINÄ TAMPEREEN LÄNTINEN KEHÄTIE

Taulukko 22. Neuroverkon ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 2 investointi- ja ylläpitokustannukset.

KUSTANNUKSET, €													
Liittymä	LAM-piste				Tieosamittausasema		Sähkönsyöttö			Tietoliikenne			
	mittausyksikkö	ilmaisinsilmukka	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	investointi	ylläpito	kaapeli	investointi	ylläpito	kaapeli	
Elovainio	5500	330	4000	240	42000	2500	2000	170	0	3500	720	0	
Pikku-Ahvenisto	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3200	3500	720	1600	
Myllypuro	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3200	3500	720	1600	
Kalkku	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3600	3500	720	1800	
Pitkäniemi	11000	660	8000	480	42000	2500	2000	170	3600	3500	720	1800	
Rajaniemi	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3200	3500	720	1600	
Pirkkala	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3400	3500	720	1700	
Linnakorpi	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	3200	3500	720	1600	
Sarankulma	11000	660	8000	480	0	0	2000	170	2400	3500	720	1200	
Lakalaiva	5500	330	4000	240	42000	2500	2000	170	0	3500	720	0	
Yhteensä	99000	5940	72000	4320	126000	7500	20000	1700	25800	35000	7200	12900	
Investointi	391 000												
Ylläpito	26 700												

Investointi	391 000
Ylläpito	26 700

6.3 Eri vaihtoehtojen edut ja rajoitukset

VALTALIISEn mukainen seuranta

Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa LAM-pisteet on esitetty sijoitettavaksi liittymävälien keskivaiheille. Tarkoitus on seurata lähinnä pistenopeutta ja poikkileikkauksen liikennemäärää. Pistemittaus antaa kuvan vain kyseisen poikkileikkauksen liikennetilanteesta, joka ei välttämättä kuvaa koko linkin liikennetilannetta. Toisaalta liittymävälit ovat varsin lyhyitä (2–3 km), joten mittauspisteitä on kohtuullisen tiheässä ja yhdessä poikkileikkauksessakin havaittu liikennetilanne kuvannee koko linkin tilannetta kohtuullisesti.

Pistemittaus ei kärsi satunnaisista ilmaisinvirheistä samalla tavalla kuin esimerkiksi liikennevirtamalli. Lisäksi yhden mittauspisteen sijoittaminen linkille on vaihtoehtoista kustannuksiltaan pienin (investointi n. 135 000 € ja ylläpito noin 15 100 €/vuosi).

Liikennevirtamalli

Liikennevirtamallin käyttö vaatii paljon ilmaisimia, koska kaikki linkille saapuva ja siltä poistuva liikenne on mitattava. Laajojen eritasoliittymien tapauksessa tarvitaan useimmiten kaksi mittausyksikköä, koska nykyisissä LAM-pisteissä maksimi kaapelipituus on noin 100 m. Myynnissä on kuitenkin myös vastaavia ulkomaisia mittauslaitteita, joiden maksimi kaapelipituus on 200 m. Kahden mittausyksikön tarve nostaa kustannuksia huomattavasti, koska suurin osa LAM-pisteen kustannuksista aiheutuu juuri mittausyksiköstä. Huolimatta kahdesta mittausyksiköstä selvittää yleensä yhdellä sähkö- ja tietoliikenneliittymällä kaapeloimalla mittausyksiköt paikallisesti yhteen.

Liikennevirtamalli kärsii ilmaisinvirheiden aiheuttamasta kumuloituvasta virheestä. Menetelmän luotettavuuden parantamiseksi virheen korjaamista tulee tutkia lisää. Liikenteen seurantatekniikan kehittyessä ilmaisinvirheiden

määrä oletettavasti vähenee, jolloin liikennevirtamallista tulee nykyistä varteenotettavampi vaihtoehto.

Liikennevirtamallin hyvänä puolena on se, että sen avulla voidaan seurata tieosakohtaisia parametreja (eli liikennetiheyttä ja sitä myötä matka-aikaa) käyttämällä hyväksi pisteseurantaa. Liikennevirtamallin avulla saadaan arviotua liikennetilanneluokka linkkikohtaisesti.

Liikennevirtamallin vaatiman ilmaisinsijoittelun investointikustannukset ovat 1,6–2 -kertaiset (217 000–265 000) ja ylläpitokustannukset 1,2–1,3 -kertaiset (17 900–19 200) Valtakunnallisessa liikenteen seurannan esitetyn seurantalaitteiston kustannuksiin nähden. Ilmaisinsijoitteluvaihtoehto 2 on sekä investointi- että ylläpitokustannuksiltaan vaihtoehtoa 1 kalliimpi. Tämä johtuu pääosin siitä, että ilmaisinsijoitteluvaihtoehdolla 2 tarvitaan nykytekniikalla jokaisessa liittymässä kaksi mittausyksikköä, mutta vaihtoehdolla 1 selvittää osassa liittymistä yhdellä mittausyksiköllä.

Neuroverkko

Neuroverkoilla voidaan yhdistää erilaista lähtötietoa. Tässä esitetyt ilmaisinsijoittelut ja lähtötietoyhdistelmät ovat yksi mahdollinen vaihtoehto. Parhaan ilmaisinsijoittelun ja lähtötietoyhdistelmän määrittäminen voi olla vaikeaa. Lähtötiedoksi tulisi valita suuret, joissa liikennetilanne ja sen muutokset näkyvät parhaiten. Nämä suuret saattavat vaihdella linkeittäin.

Tässä on esitetty, että matka-aikoja mitataan tiejaksolla kolmen tieosaseurantapisteen avulla. Ensimmäisessä ehdotetussa vaihtoehdossa matka-aikamittauksen lisäksi jokaisen linkin keskellä on LAM-piste, jonka tietoja voidaan käyttää määrittämään, mikä liittymäväli on ruuhkautunut. Toisessa esitettyssä vaihtoehdossa LAM-pisteet sijaitsevat jokaisen linkin alussa ja lopussa (liittymisrampin jälkeen ja ennen poistumisrampia). Yksi vaihtoehto olisi myös sijoittaa ilmaisimet liittymien keskelle liikennevirtamallin ilmaisinsijoitteluvaihtoehdon 1 mukaisesti. Linkille saapuvaa ja siltä poistuva liikennemäärää voidaan käyttää kuvaamaan linkin liikennetilannetta.

Neuroverkon käyttäminen vaatii opetusprosessin, jota varten on oltava tarpeeksi paljon opetusdataa erilaisista liikennetilanteista. Tämä tarkoittaa sitä, että neuroverkkoihin perustuvaa liikennetilanteen arviointimenetelmää ei voida ottaa käyttöön välittömästi tiejakson valmistuttua. Ensin on kerättävä tarpeeksi mittaustietoa, jota voidaan käyttää neuroverkon opettamiseen.

Neuroverkoille ehdotettujen ilmaisimien investointikustannukset ovat 2–3 -kertaiset (278 000–391 000 €) ja ylläpitokustannukset 1,5–1,8 -kertaiset (23 300–26 700) Valtakunnallisessa liikenteen seurannassa esitetyn seurantalaitteiston kustannuksiin nähden. Neuroverkoille voidaan kuitenkin syöttää myös muuta kuin tässä esitettyä lähtötietoa. Kaikilla liittymäväleillä ei välttämättä tarvita LAM-pistettä, vaan mittauspisteiden sijoittaminen tulee miettiä ottamalla tarkemmin huomioon tiejakson ja sillä esiintyvien liikennetilanteiden ominaisuudet ja erityispiirteet. Mikäli esim. matka-aikamittauksesta luovutaan tai LAM-pisteitä sijoitetaan tiejaksolla vähemmän, neuroverkkoihin perustuvien menetelmien kustannukset putoavat huomattavasti. Etukäteen

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

on vaikea sanoa, mikä ilmaisins- ja lähtötietomäärä on luotettavan liikennetilannearvioinnin kannalta riittävä.

Neuroverkkojen käytön hyvänä puolena on myös se, että neuroverkkoja ja niiden ilmaisinsijoittelua voidaan käyttää myös lyhyen aikavälin liikennetilanne-ennusteiden tekemiseen. Tätä varten neuroverkot on opetettava uudelleen käyttämällä vasteena halutun ennustejakson kuluttua toteutunutta matkanopeutta (tai -aikaa). Innamaa (2002) on havainnut, että lyhyen ajan ennusteissa tarpeellinen syöte on seurantajakson tuleva liikennemäärä eli pistetiedon mittauspiste tulisi sijoittaa ennen seurantajaksoa (ylävirtaan). Neuroverkoille esitetyllä ilmaisinsijoittelulla 2 voidaan syöteenä käyttää aivan matka-aikaseurantajakson alussa mitattua liikennemäärää. Innamaa (2002) on myös todennut, että liikennemäärätiedot olisi hyvä saada kaikista merkittävistä seurantajakson tulevista ja siltä poistuvista liikennevirroista. Neuroverkoille ehdotetulla ilmaisinsijoittelulla 2 saadaan tieto kullekin liittymävälille tulevasta ja siltä poistuvasta liikennemäärästä. Liikennemäärätiedot ovat muutenkin oleellisia, koska niiden avulla voidaan arvioida mitattujen matka-aikojen luotettavuutta. Jos liikennemäärästä ei ole tietoa, on vaikea arvioida, johtuvatko pitkät matka-ajat ruuhkasta vai onko kyseessä esim. mittausvirhe. Muidenkin menetelmien vaatimusten mukaan sijoitettujen ilmaisimien mittaus-tietoja voidaan käyttää syöteinä lyhyen aikavälin ennusteiden teossa neuroverkkojen avulla, mutta oletettavasti matka-aikojen ja linkille tulevan ja siltä poistuvan liikennemäärän käyttö syöteinä parantaa ennusteiden tuloksia esimerkiksi linkin keskellä mitattuihin pistetietoihin verrattuna.

7 PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

7.1 Yleistä

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, mitä menetelmiä voidaan käyttää liikennetilanteen eli liikenteen sujuvuuden arviointiin, kun lähtötiedon määrä ja laatu vaihtelee. Liikennetilanteen arvioinnissa käytettävien lähtötietojen perustan muodostavat liikenteen automaattisen mittauksen (LAM) tuottamat pistetiedot (liikennemäärä, pistenopeus, ilmaisimen varausaste). Lähtötietona voidaan käyttää varsinaisen liikenteen seurannan tuottaman piste- ja tieosakohtaisen tiedon (matka-aikojen) lisäksi myös muista lähteistä saatavia tietoja, joita ovat mm. tiedot säästä ja kelistä, mahdollisista onnettomuuksista ja tietöistä, liikennevaloista saatavat tiedot sekä historiatiedot liikenteestä.

Eri tyyppisiä menetelmiä käytiin läpi kirjallisuustutkimuksessa, jonka perusteella valittiin lähemmin tarkasteltavat menetelmät. Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellut menetelmät luokiteltiin pistemittausta hyödyntäviin menetelmiin, liikennevirtamalleihin, tilastollisiin menetelmiin, datafuusiomenetelmiin, mikrosimulointiin ja dynaamiseen sijoitteluun. *Taulukossa 23* on esitetty eri menetelmien tarvitsemia lähtötietoja.

Taulukko 23. Eri menetelmien tarvitsemia lähtötietoja.

Menetelmäluokka	Menetelmä	Tarvittavat lähtötiedot
Pistetiedon käsittely	Pistenopeuden käyttö matkanopeutena	Pistenopeus tarkasteltavan tiejakson keskellä tai päissä
	Matka-ajan arvioiminen pistemittaustietojen avulla	Pistemittaustiedot tarkasteltavan tiejakson päissä
Liikennevirtamallit		Makroskooppinen malli, pistemittaus ainakin tarkasteltavan tiejakson päissä
Tilastolliset menetelmät	Historiatietokannan hyödyntäminen, aikasarja-analyysi	Historiatietoa lähtötiedosta (esim. liikennemäärät, pistenopeudet, sää ja keli) sekä liikennetilanteesta
Datafuusiomenetelmät	Bayesilainen ja Dempster-Shafer -päättely	Erilaisia sujuvuutta kuvaavia mittaustietoja sekä todennäköisyydet, joilla ne kuvaavat eri liikennetilanteita
	Kalman-suodin	Malli ja mittaustietoa, esim. makroskooppinen malli, pistemittaus tarkasteltavan tiejakson päissä ja ajantasaista mittaustietoa (esim. lisäpistemittaus tai anturiajoneuvot)
	Neuroverkot	Erilaista liikennetilannetta kuvaavaa tietoa, joka voi olla esitetty eri yksiköissä. Opetusdataa (ohjatussa oppimisessa tiedettävä myös toteutunut liikennetilanne)
	Sumea logiikka	Erilaista liikennetilannetta kuvaavaa tietoa, joka voi olla esitetty eri yksiköissä
	Asiantuntijajärjestelmät	Erilaista liikennetilannetta kuvaavaa tietoa, joka voi olla esitetty eri yksiköissä
Simulointi		Liikennemäärä jokaisen linkin alussa, liikenneverkon kuvaus
Dynaaminen sijoittelu		OD-matriisin lähtöarvo, liikenneverkon kuvaus, ajantasaista liikennemäärätietoa

Tarkemmassa tutkimuksessa, jossa käytettiin simuloitua liikennetietoa, tarkasteltiin kahta pistenopeuteen perustuvaa menetelmää, yksinkertaista liikennevirtamallia ja neuroverkkoja. Pistenopeuteen perustuvat menetelmät valittiin sen perusteella, että ne hyödyntävät nykyistä liikenteen seurantatekniikkaa (pisteseurantaa) ja ovat tämän takia käytännön sovelluksissa yksinkertaisia toteuttaa. Liikennevirtamalli vaikutti kiinnostavalta, koska sen avulla voidaan seurata tieosakohtaisia parametreja (liikennetiheys ja matkanopeus) käyttämällä hyväksi pistemittaustietoja. Neuroverkot valittiin siksi, että niiden avulla voidaan yhdistää erityyppistä seurantatietoa.

Simuloinnin etuna on se, että menetelmiä voidaan testata systemaattisesti useilla erilaisilla liikennetilanteilla ja ilmaisinsijoitteluilla. Johtopäätöksiä tehtäessä on muistettava, että tutkimuksessa käytettiin vain simulointiohjelmia. Tuloksiin vaikuttaa se, kuinka tarkasti simulointimalli onnistuu kuvaamaan todellista liikenneympäristöä ja todellisia liikennetilanteita. Simulointitutkimuksessa joudutaan tekemään aina joitain oletuksia ja yksinkertaistuksia.

Simulointitutkimus toteutettiin Hutsim-mikrosimulointiohjelmalla. Tutkimuksen koealueena käytettiin yksinkertaista kahden linkin moottoritiejaksoa, joka sisälsi kolme liittymisrampia ja kaksi poistumisrampia.

Liikennetilannetta kuvaavaksi suureeksi valittiin tässä työssä matkanopeus, sillä tämänhetkinen liikennetilannetiedotus perustuu vallitsevan nopeustason alenemaan vapaasta nopeudesta.

7.2 Pistenopeuteen perustuvat menetelmät

Yksinkertaisimpina menetelminä simulointitutkimuksessa tarkasteltiin pelkkään pistenopeuteen perustuvia menetelmiä. Ensimmäisessä, yhden mittauspisteen menetelmässä linkin keskellä mitattu pistenopeus yleistettiin koko linkin matkanopeudeksi. Toisessa, kahden mittauspisteen menetelmässä puolestaan oletettiin, että ajoneuvot ajavat linkin alussa mitattua nopeutta linkin puoleenväliin ja jatkavat tämän jälkeen linkin lopussa mitatulla nopeudella.

Kahden mittauspisteen käyttäminen ei välttämättä paranna matkanopeusestimaattia yhden mittauspisteen käyttämiseen verrattuna, etenkin, kun mittauspisteet on sijoitettu liittymiin, kuten tämän työn simulointitutkimuksessa. Jos tilanne liittymissä poikkeaa linkin liikennetilanteesta, matkanopeusestimaatti on virheellinen. Kahden mittauspisteen tapauksessa nopeustasoa voidaan kuitenkin tarkastella myös poikkileikkauskohtaisesti, mitä tässä työssä ei tehty. Tällöin saadaan tietoa siitä, kummassa päässä linkkiä mahdolliset sujuvuusongelmat ovat.

Kahden mittauspisteen tapauksessa mittauspisteet oli sijoitettu joko liittymän keskelle (vaihtoehto 1) tai heti liittymisrampin jälkeen ja välittömästi ennen poistumisrampia (vaihtoehto 2). Simulointikokeessa huomattiin, että esimerkiksi tilanteessa, jossa rampilta tuleva liikennemäärä vaihteli (ja jossa sujuvuusongelmat aiheutuivat lähinnä siitä), parempi tulos saatiin ilmaisinsijoittelulla 1, koska ilmaisinsijoittelu 2 ei ota huomioon tilannetta liittymissä. Toisaalta tilanteessa, jossa rampille poistuvan liikenteen osuus vaihteli (ja jossa sujuvuusongelmat aiheutuivat lähinnä siitä), parempi tulos saatiin ilmaisinsijoittelulla 2. Ilmaisinsijoittelulla 1 ei tässä tilanteessa havaita ongelmaa, koska tilanne liittymien keskellä on vapaa.

Pistenopeusmenetelmien antaman liikennetilannearvion luotettavuus häiriötilanteen yhteydessä on heikko. Pistenopeusmenetelmät antoivat simulointikokeessa häiriön sijainnista riippuen joko liian suuria tai pieniä matkanopeusarvioita. Pistenopeus eroaa paikallisen häiriötilanteen aikana yleensä matkanopeudesta suuresti.

Kun häiriö sijaitsi linkin keskellä olevan mittauspisteen jälkeen, yhden mittauspisteen menetelmä antoi varsin hyvän tuloksen, koska häiriön takia ajoneuvojen nopeus mittauspisteen kohdalla oli alhainen. Toisaalta häiriön ollessa paikallinen voi yhden mittauspisteen antama nopeusarvio olla tässä tapauksessa koko linkin matkanopeuteen nähden liiankin alhainen.

Kun häiriö sijaitsi ennen linkin keskellä olevaa mittauspistettä, yhden mittauspisteen menetelmä antoi hyvin harhaanjohtavan tuloksen. Häiriön aikana pistenopeus oli jonkin verran vapaata nopeutta alempi, mutta häiriön purkautuessa pistenopeus laski jyrkästi. Tämä johtui siitä, että häiriön poistuessa kertynyt jono lähtee purkautumaan hitaalla nopeudella. Pelkän pistenopeuden tarkkailu johtaa tässä tilanteessa helposti virhepäätelmiin. Tilanteen saatetaan tulkita olevan huononemassa, vaikka ruuhka itse asiassa purkautuu.

Häiriön sijaitessa linkin keskellä kahden mittauspisteen menetelmän oli vaikea havaita häiriötä, koska tilanne liittymissä eli mittauspisteiden kohdilla oli vapaa. Häiriön kestäessä sen vaikutukset alkoivat näkyä ylävirran il-

maisimella. Mitä lähempänä ylävirran ilmaisin oli häiriön sijaintipaikkaa, sitä nopeammin häiriön aiheuttama matkanopeuden lasku havaittiin.

Pelkkää pistenopeustietoa käytettäessä liikennetilannearvion onnistuminen riippui voimakkaasti ruuhkan paikasta mittauspisteiden sijaintiin nähden. Molemmat menetelmät antoivat hyvän matkanopeusestimaatin, kun liikennetilanne linkillä oli homogeeninen. Ongelmana kuitenkin on, että yhden pistemittauksen perusteella ei tiedetä, onko tilanne pistemittauksen osoittama koko linkillä vai vain mittauspisteen ympäristössä. Virhepäätelmien riski on sitä suurempi, mitä pidempi tarkasteltava linkki tai tiejakso on. Pitkällä linkillä linkin osittainen ruuhkautuminen ei välttämättä näy yhdessä poikkileikkauksessa mitatussa pistenopeudessa lainkaan.

Mittauspisteen paikan valinta on aina kompromissin tekemistä, koska yhdellä pistemittauksella nähdään tilanne vain yhdessä kohtaa linkillä. Edustavimman sijainnin määrittäminen on haasteellista ja se voi vaihdella linkkikohtaisesti. Kun seurataan pelkkiä pistetietoja, mittauspisteen sijaintia päätettäessä tulisi ottaa huomioon linkin ja sillä normaalisti esiintyvien liikennetilanteiden ominaispiirteet. Simulointitulosten perusteella voidaan sanoa, että liikenteellisesti ja geometrisesti tasalaatuisella linkillä voidaan yhden pisteen liikennetilannearvio yleistää kohtuullisella luotettavuudella koko linkille. Jos linkki on useita kilometrejä pitkä tai sillä on häiriö, voi yhden mittauspisteen perusteella arvioitu liikennetilanneluokka kuitenkin olla virheellinen.

7.3 Liikennevirtamalli

Tutkittu liikennevirtamalli perustuu liikennetiheyden laskemiseen jatkuvuusyhtälöllä eli tiejaksolta poistuvien ja sille saapuvien ajoneuvojen erotuksen perusteella. Liikennetiheys on tieosakohtainen parametri, ja sen mittaaminen tähän tapaan pistemittautustietojen avulla tuntuu houkuttelevalta. Mikäli käytettävissä olisi täysin virheettömiä ilmaisimia, liikennetiheys ilmaisimien välillä voitaisiinkin laskea virheettömästi. Simulointitulosten perusteella näin saataisiin hyvä estimaatti myös matkanopeudelle.

Liikennevirtamalli estimoi matkanopeuden varsin hyvin lähes kaikissa simuloinnissa testatuissa tapauksissa (jos oletetaan, ettei ilmaisinvirheitä ole). Jopa häiriötilanteissa nopeuden lasku arvioitiin oikein. Liikennevirtamalli havaitsi häiriön aiheuttaman nopeuden laskun paljon ennen, kun se näkyi pistenopeuden alenemisena.

Simulointitutkimuksessa havaittiin liikennevirtamallin mielenkiintoinen ominaisuus: liikennevirtamalli toimii paremmin ruuhkassa kuin vapaassa liikennetilanteessa. Ilmaisinvirheiden aiheuttama virhe näkyy liikennevirtamallin tuloksessa siten, että samansuuruinen virheprosentti ilmaisimissa aiheuttaa vapaassa liikennetilanteessa suuremman virheen kuin ruuhkassa. Tämä johtuu siitä, että pienillä liikennetiheyksillä sama suhteellinen virhe liikennemäärämittauksessa aiheuttaa liikennetiheysarvioon suuremman suhteellisen virheen kuin vilkkaassa liikenteessä. Liikennevirtamallin tulos kärsii myös satunnaisvaihtelusta enemmän vapaassa kuin ruuhkaisessa liikennetilanteessa. Tämä on luonnollista, koska pienillä liikennemäärillä yhdessä laskentajaksossa havaittujen ajoneuvojen lukumäärän suhteellinen vaihtelu on ruuhkatilannetta suurempaa.

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

Suurin liikennevirtamallin hyödyntämisen ongelma ovat ilmaisinvirheet. Todellisuudessa ilmaisimet jättävät osan ajoneuvoista havaitsematta. Koska liikennetiheyden laskenta perustuu aina liikennetiheyden arvoon edellisellä ajanhetkellä, aiheutuu ilmaisinvirheistä liikennetiheydestimaattiin kumuloituva virhe. Virhe liikennetiheydessä voi kasvaa nopeasti hyvin suureksi jo pienilläkin virheprosentteilla. Oh ym. (2002) ehdottavat korjauskertoimien käyttöä, jos tulevaa ja poistuvaa liikennettä mittaavien ilmaisinten virheprosenttien tiedetään olevan erisuuruisia. Jos ero on systemaattinen, liikennetiheydestimaattiin kertyvä virhe voidaan poistaa korjauskertoimia käyttämällä. Virheet syntyvät kuitenkin satunnaisesti, jolloin korjauskertoimien käyttö ei takaa virheen korjautumista. Ilmaisimen virheprosentin ei myöskään voida olettaa olevan vakio, vaan se todennäköisesti muuttuu mm. liikennetilanteen mukana.

Yksi mahdollisuus vähentää ilmaisinvirheiden vaikutusta on käynnistää laskenta uudelleen riittävän usein. Parasta on, jos laskenta voidaan aloittaa alusta hetkellä, jolloin linkillä ei ole yhtään ajoneuvoa, ja liikennetiheyden tiedetään olevan 0 ajon/km. Liikennetiheyden alkuarvossa mahdollisesti oleva virhe pysyy liikennetiheydestimaatissa koko laskennan aikana vakiosuuruisena.

Tässä työssä käytettiin kahta tekniikkaa, joiden avulla liikennetiheyden alkuarvoa voidaan arvioida. Ensimmäisessä liikennetiheyden alkuarvo arvioitiin linkin päissä olleiden ilmaisinten varausasteiden perusteella. Toisessa käytettiin vapaan liikennevirran matka-aikaa vastaavana aikana havaittujen ajoneuvojen määrää liikennetiheysarviona. Liikennetiheyden korjaus pyrittiin tekemään hetkellä, jolloin liikennetilanne oli vapaa. Tämä pääteltiin linkin alussa ja lopussa mitattujen varausasteiden ja pistenopeuksien perusteella. Liikennetilanteen ollessa linkillä epähomogeeninen, voivat linkin päissä mitattu varausaste ja pistenopeus antaa tilanteesta virheellisen kuvan, jolloin liikennetiheysarviota saatetaan korjata tilanteessa, jossa korjausta ei tulisi tehdä. Tämä tulee esille erityisesti tilanteissa, joissa linkin keskellä on paikallinen häiriö.

Testatuissa tilanteissa (lukuun ottamatta häiriötilannetta) liikennetiheyden suuret virheet korjautuivat molemmilla tekniikoilla kohtuullisen hyvin. Liikennetiheyden arvoon jää helposti muutaman ajoneuvon virhe, mikä näkyy erityisesti vapaan liikennetilanteen matkanopeusarviossa, mutta ruuhkan aikana virheen suhteellinen merkitys pienenee. Myös Manstetten ja Maichle (1996) (ks. luku 3.3.7) ovat tutkineet liikennetiheydestimaattiin kertyvän virheen korjaamista pistenopeustietoon perustuen. He käyttivät sumeaa logiikkaa ja pystyivät korjaamaan liikennetiheyden suuret virheet. Neuroverkkojen avulla muotoilluilla sumeilla säännöillä he pystyivät korjaamaan virheet jopa häiriötilanteissa. Tässä työssä saadut tulokset tukevat käsitystä, että liikennetiheydestimaatti saadaan korjattua yksinkertaisten päättelysääntöjen avulla oikealle tasolle tilanteissa, joissa pistemittaus antaa tarpeeksi edustavan kuvan koko linkin liikennetilanteesta, mutta häiriötilanteissa asia ei ole yhtä yksinkertainen. Myös Nanthawichitin (2003) tutkimukset (ks. luku 3.3.9) tukevat käsitystä, että liikennevirtamalliin on hyvä yhdistää muuta mittaustietoa.

Liikennevirtamallin käyttöä suuren mittakaavan sovelluksissa saattaa rajoittaa suuri mittauspisteiden määrä. Liikennevirtamallia voidaan käyttää vain sellaisiin tieosuuksiin, joilta saadaan mitattua kaikki linkille menevä ja siltä

poistuva liikenne. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikissa liittymissä täytyy olla ilmaisimet liikennemäärän laskemiseksi. Tällä hetkellä näin ei Suomessa ole, vaan suurin osa pistemittausasemista on sijoitettu muualle kuin liittymiin. Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa ilmaisimet päätielle ennen poistumisrampia ja heti liittymisrampin jälkeen. Tällöin kuitenkin poistumis- ja liittymisrampin välisen osuuden liikennetilanne jää arvioimatta.

Simulointitutkimuksessa ilmaisinsijoittelun havaittiin vaikuttavan liikennevirtamallin tuloksiin lähinnä siten, että mittauspisteiden sijaitessa liittymisrampin jälkeen ja ennen poistumisrampia (ilmaisinsijoittelu 2) tilanne liittymissä jää havaitsematta. Tämä johti hieman heikompiin tuloksiin, mutta vaikutus ei ollut suurta.

Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa (Tiehallinto 2002) on esitetty, että moottoriväylillä pistemittausilmaisimet sijoitettaisiin eritasoliittymien kohdalle ja vähintään liittymisrampeille. Näin kaikki liittymävälille saapuva liikenne saadaan mitattua, mutta poistumisrampien liikennemäärä jää edelleen mittaamatta. On myös varsin todennäköistä, että kustannussyistä kaikkia liittymiä ei varusteta ilmaisimilla, koska osa liittymistä ei ole liikenteellisesti merkittäviä. Jos kaikkien rampien liikenne halutaan mitata, saatetaan nykyisellä mittaustekniikalla tarvita kaksi LAM-mittausyksikköä. Nykyisin käytettävällä tekniikalla ilmaisimet voivat sijaita maksimissaan 100–200 m päässä LAM-yksiköstä. Lisäksi yhteen mittausyksikköön voi kytkeä enintään 16 silmukkailmaisinta.

Liikennevirtamalli antoi hyviä tuloksia tämän työn simulointitutkimuksessa, jossa käytettiin yksinkertaista kahden linkin moottoritiemallia. Menetelmää on kuitenkin syytä testata myös toisenlaisessa ympäristössä, jotta sen toimivuudesta voidaan tehdä pidemmälle meneviä päätelmiä. Vaikka mittausvirheiden aiheuttamat ongelmat saataisiin korjattua, liikennevirtamallin käyttöä suuren mittakaavan sovelluksissa rajoittaa suuri mittauspisteiden määrä, joka nykytekniikalla toteutettuna johtaa varsin suureen kustannusten määrään.

Simulointikokeessa huomattiin, ettei pistemittaus aina riitä kuvaamaan linkin liikennetilannetta tarpeeksi tarkasti. Vaikka pistemittausta tehtäisiin sekä linkin alussa että lopussa, saattaa tilanne ilmaisinten välillä poiketa linkin päiden tilanteesta huomattavastikin. Liikennevirtamallin ja jatkuvuusyhtälön käytön hyvänä puolena on se, että niiden avulla pystytään seuraamaan liikennetiheyttä eli ilmaisinten välisellä tieosuudella olevien ajoneuvojen lukumäärää, joka vaikuttaa tiejakson keskimääräiseen matkanopeuteen. Jatkuvuusyhtälöä käyttämällä päästään kiinni tieosakohtaisiin parametreihin, vaikka seurantaan käytetään täysin samaa tekniikkaa kuin pistemittauksessa (silmukkailmaisimia).

7.4 RBF-neuroverkko

Datafuusiomenetelmillä voidaan yhdistää eri tyyppistä tietoa. Sumea logiikka sopii tilanteisiin, joissa mallinnettavasta järjestelmästä on olemassa riittävästi asiantuntijatietämystä, mutta sitä on vaikea pukea matemaattisen mallin muotoon. Sumean logiikan avulla esimerkiksi kokeneiden liikenneinsinöörin asiantuntemus muutetaan sumeiksi säännöiksi ja sumeiksi joukoiksi, joiden avulla lähtöarvojen ja liikennetilanteen riippuvuutta kuvataan. Sumean logii-

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

kan sääntöjen muotoileminen on kuitenkin haastava tehtävä, ja siihen tarvitaan mallinnettavan liikenneverkon ominaisuuksien tuntemusta. Sumean logiikan mahdollisuuksia voi kuvata miettimällä, osaisiko itse päätellä liikennetilanteen annettujen lähtötietojen perusteella. Mikäli tämä onnistuu, on tietämys siirrettävissä sumean logiikan muotoon.

Mikäli lähtötietoa ja asiantuntemusta sääntöjen muotoilemiseksi on liian vähän, ei liikennetilanteen päättely sumealla logiikalla ole mahdollista. Tällöin päättely voidaan ikään kuin automatisoida neuroverkkojen avulla. Neuroverkot ovat ns. black box -malleja eli ne sopivat tilanteisiin, joissa mallinnettavasta järjestelmästä ja sen lainalaisuuksista ja muuttujien välisistä riippuvuuksista ei ole tarpeeksi tietoa, jotta systeemi voitaisiin mallintaa analyttisesti. Neuroverkkojen toiminta perustuu opetusprosessiin, jossa niille syötetään esimerkkitalanteita ja tilanteiden vasteita. Neuroverkot oppivat opetusprosessin aikana ilmiön lainalaisuudet ja saattavat vähäisemmästäkin lähtötiedon määrästä löytää riippuvaisuuksia, joita ihminen ei huomaa. Mittaustietoa on kuitenkin oltava niin paljon, että liikennetilanteen muutos havaitaan seurantatiedoissa. Mitä nopeampi ja luotettavampi menetelmä halutaan, sitä enemmän liikenteen seurantatietoa tarvitaan.

Neuroverkot eivät ole siirrettävissä yhdeltä alueelta toiselle vaan neuroverkko on aina opetettava uuden alueen datalla. Myös sumea logiikka antanee paremman tuloksen, kun sumeat säännöt ja joukot kalibroidaan mallinnettavan alueen ominaisuuksia vastaaviksi, vaikka tietyt lainalaisuudet säilyvät aluetta vaihdettaessakin. Neuroverkoilla ja sumealla logiikalla voidaan huomioida monenlaisia ja erimuotoisia lähtötietoja, kuten mittaustietoa liikenteestä ja säästä, historiatietoa, häiriötietoa jne. Neuroverkkoja ja sumeaa logiikkaa käytettäessä myös mittaustiedoissa tapahtuvia muutoksia on syytä käyttää päättelyn lähtötietoina. Tämä täytyy erikseen määritellä datafuusio-menetelmää suunniteltaessa (eli valita yhdeksi syötteeksi lähtötiedossa ajanhetkestä toiseen tapahtuva muutos), sillä muuten liikennetilannearvio muodostuu vain kyseisen ajanhetken lähtötiedoista. Tässä työssä toteutetuissa neuroverkoissa lähtötietojen muutosnopeutta ei huomioitu, mikä varmasti osaltaan vaikeutti mm. häiriöiden havaitsemista.

Tässä työssä neuroverkkojen syötteiksi valittiin kahden minuutin jaksoissa ilmaisimittain mitatut liikennemäärä, pistenopeus ja varausaste sekä kahden linkin osittain kattava matka-aikamittaus. Neuroverkkojen ilmaisinsijoittelussa oli kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa mittauspisteet sijaitsivat liittymien keskellä ja rampeilla ja toisessa vaihtoehdossa mittauspiste oli sijoitettu vain linkin alkuun eli liittymisrampin jälkeen. Vaihtoehdoista jälkimmäinen tuotti paremmat tulokset. Tämä johtunee siitä, että syötevektorin dimensio oli tässä tapauksessa pienempi. Jotkin käytetyt syötteet (esim. liikennemäärät eri ilmaisimilla) ovat toisistaan riippuvaisia, mikä tarkoittaa, että osa syötetiedosta ei tuo malliin uutta selitysvoimaa. Tämä johtaa siihen, että neuroverkko mukautuu myös kohinaan ja yrittää mallintaa sitä. Lähtötiedon tarkempi esikäsittely (kuten pääkomponenttianalyysin käyttö tai datan normaaminen) saattaisi parantaa neuroverkkojen antamia tuloksia.

Neuroverkon toiminta riippuu paljon opettamisen onnistumisesta. Opetusdatassa tulee olla riittävän kattavasti erilaisia tilanteita. Opetusdataa tulee olla riittävästi myös estimoitavien parametrien määrään nähden, ettei ylioppimista tapahdu. Neuroverkko pystyy interpoloimaan sille annettujen opetustilanteiden väliltä, mutta jos syöteenä on tilanne, joka poikkeaa opetusdatasta

liikaa, neuroverkon vaste voi olla täysin väärä. Mallin syötteisiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota ja valita syötteiksi ne (mittaus)tiedot, joissa liikennetilanne ja sen muutokset parhaiten näkyvät. Innamaa ym. (2002) ovat valinneet lyhyen ajan liikenne-ennustemalliensa syötteet tutkimalla syötemuuttujien korrelaatiota tarkasteltavan vasteen kanssa (ks. luku 3.3.5). Syötteiden tarkempi valinta olisi tässäkin työssä todennäköisesti tuottanut paremmat matkanopeusarviot.

Neuroverkot tuottivat suuressa osassa tutkittuja tapauksia paremmat matkanopeusestimaatit, kuin pelkkään pistenopeuteen perustuvat menetelmät. Tämä tarkoittaa sitä, että liikennemäärä-, varausaste- ja matka-aikamittauksella on selitysvoimaa matkanopeutta arvioitaessa. Matka-aikamittauksen selitysvoima on luonnollista, mutta simulointitutkimuksessa havaittiin, että neuroverkot tuottivat pistenopeusmalleja paremmat tulokset myös tapauksissa, joissa mitattu matka-aika ei reagoinut liikennetilanteen muutokseen. Pistenopeusmenetelmiin verrattuna neuroverkot pärjäsivät hyvin erityisesti häiriötilanteissa. Ne havaitsivat häiriön aiheuttaman matkanopeuden laskun ennen kuin se näkyi pistenopeusmittauksissa. Neuroverkon onnistumiseen vaikutti se, että sitä oli opetettu myös häiriötilanteilla, joita simuloinnin avulla on helppo luoda. Todellisuudessa häiriötilanteita on kuitenkin niin harvoin, että opetusdataa olisi vaikea saada.

Simulointitutkimuksessa huomattiin myös, että neuroverkot valituilla syötteillä eivät olleet herkkiä satunnaisille ilmaisinvirheille, kuten esimerkiksi liikennevirtamalli on. Tämä on luonnollista, koska mittausvirheillä ei ole suurta vaikutusta syötteinä käytettyyn pistenopeuteen ja matka-aikaan eivätkä virheet myöskään kumuloidu samalla tavalla kuin liikennevirtamallissa.

7.5 Yhteys lyhyen aikavälin ennusteisiin

Liikennetilanteen estimoimisen lisäksi liikenteen lyhyen aikavälin ennusteita on tutkittu paljon. Useita menetelmiä voidaan käyttää sekä estimoimiseen että ennustamiseen. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi neuroverkot, joita Suomessakin on käytetty useassa tutkimuksessa (mm. Innamaa, Pursula 2000, Innamaa ym. 2002 ja Innamaa 2002). Muutkin datafuusiomenetelmät soveltuvat lyhyen ajan ennusteiden tekemiseen. Simuloinnin avulla ennusteita voidaan tehdä ajamalla simulointimallia nopeutetusti. Tilastollisia menetelmiä (esim. aikasarjamalleja) voidaan myös käyttää liikennetilanteen ennustamiseen.

Luvussa 3.3.5 kerrottiin Innamaan ym. (2002) tutkimuksesta, joissa neuroverkot tuottivat matka-aikaa ennustettaessa paremmat tulokset kuin sitä estimoitaessa. Ennusteiden tekemiseen käytettiin syötteinä seurantajakson tämän hetkistä matka-aikaa sekä pistemittauksietoa, mutta estimointimallissa vain pistemittauksietoa sekä viereisten linkkien matka-aikamittauksietoa. Estimoimiseen käytetty lähtötieto ei kuvannut tarpeeksi hyvin tarkasteltavan tiejakson liikennetilannetta. Tarkasteltava tiejakso oli myös liian pitkä ja sisälsi useita liikenteellisesti merkittäviä liittymiä eikä liikennetilanne tiejaksolla ollut homogeeninen. Yleisesti voidaan kuitenkin olettaa, että käytettäessä samoja lähtötietoja liikennetilanteen estimoiminen on ennustamista helpompaa.

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

Jos samaa lähtötietoa ja samoja ilmaisimia käyttämällä halutaan sekä estimoida että ennustaa liikennetilannetta, on ilmaisinsijoittelussa otettava huomioon sekä estimoinnin että ennustamisen asettamat vaatimukset. Erityisesti ennustamista varten on hyvä tietää tiejaksolle tuleva liikennemäärä, mikä tarkoittaa, että ilmaisimet tulisi sijoittaa jokaisen seurantalinkin alkuun tai jonkin verran ennen linkin alkua.

7.6 Eri liikennetilanteet

Hiljaisen liikenteen aikana, kuten yöllä, ajoneuvojen nopeudet saattavat vaihdella suuresti. Liikennetilanteen estimointin pelkkään pistenopeuteen perustuen voi tällöin johtaa väärään tulokseen, koska yksikin hidas ajoneuvo saa suuren painoarvon. Kun liikennemäärä on tarpeeksi alhainen, sujuvuusongelmia ei esiinny. Sujuvuusarvioinnissa kannattaakin käyttää liikennemäärärajaa, jota alhaisemmillä liikennemäärillä liikennetilanneluokka on automaattisesti sujuva.

Simulointitutkimuksessa testattiin eri menetelmien antamia liikennetilanneestimaatteja häiriötilanteissa, joissa toinen kaista mallista oli täysin suljettu joko 45 minuutin tai kahden tunnin ajan. Häiriön paikka suhteessa mittauspisteeseen vaikuttaa merkittävästi siihen, miten häiriön aiheuttama liikennetilanteen muutos mittaustiedoissa näkyy. Hyvin paikallisia ja lyhytkestoisia häiriöitä ei välttämättä havaita mittaustiedoissa lainkaan.

Erilaisia automaattisia häiriönhavainnointimenetelmiä on kehitetty runsaasti, mutta niiden onnistumis- ja väärin hälytysten prosentit eivät ole olleet tyydyttäviä. Toisaalta häiriöt tulevat entistä useammin tietoon tienkäyttäjien tai viranomaisen ilmoitusten perusteella. Matkapuhelinten yleistymisen on osaltaan tehnyt automaattisesta häiriön havaitsemisesta entistä tarpeettomampaa. Lisäksi tietöiden tapauksessa häiriön paikka ja kesto tiedetään etukäteen. Suomessa automaattisia häiriönhavainnointimenetelmiä käytetään vain erityiskohteissa (esim. tunneleissa). Liikennetilanteen arviointiin käytettävää menetelmää voitaisiin kehittää vaiheittain ja alussa voitaisiin keskittyä tilanteisiin, joissa ruuhka aiheutuu pääasiassa kysynnän kasvusta tai paikallisesta pullonkaulasta (esim. välityskyvyltään alhainen liittymä) ja olettaa, että häiriöt tulevat tietoon manuaalisesti. Mahdollisen häiriön tullessa tietoon, sitä tulee luonnollisesti käyttää yhtenä lähtötietona liikennetilanteen arvioinnissa.

7.7 Liikenteen seurannan ja liikennetilannetiedotuksen kehittäminen Suomessa

Suomessa liikenteen seuranta tapahtuu valtaosin kiinteällä pisteseurannalla eikä esimerkiksi anturiajoneuvoja käytetä. Seurantapisteitä on verrattain vähän ja ne on alun perin suunniteltu tilastollista eikä ajantasaista seurantaa varten. Kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan todeta, että suurin osa maailmalla tutkituista menetelmistä on tarkoitettu rajatulle koalueelle, jossa silmukkalmaisimia tai muita mittalaitteita on kohtuullisen tiheässä.

Maailmalta löytyy useita kaupunkeja, jotka antavat liikenteen sujuvuustiedotusta mm. internetissä. Olemassa olevat tiedotuspalvelut kattavat yleensä

kaupunkiseutujen vilkkaimmat pääväylät, joilla myös liikenteen seuranta on ainakin osittain suunniteltu ajantasaista seurantaa silmällä pitäen. Voidaan olettaa, että sujuvuustiedotuksesta olisi Suomessakin eniten hyötyä sellaisilla kaupunkiseutujen pääväylillä, joilla liikenteen sujuvuusongelmia esiintyy usein ja joilla matka-ajan suhteelliset muutokset voivat olla suuria. Kaupunkiseutujen pääväylillä tarkoitetaan 1- tai 2-ajorataisia sekaympäristöjä, joissa on sekä eritasoliittymiä että liikennevaloja ja tasoliittymiä. Näihin ympäristöihin on valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa (Tiehallinto 2002) esitetty sijoitettavaksi LAM-pisteitä siten, että liikenteellisesti merkittävä liittymä on varustettu LAM-pisteellä. Korkeimmalla laatutasolla keskimääräinen mittauspisteiden välimatka on noin 2,5 km. Matalammalla laatutasolla mittauspisteitä on keskimäärin 5 km välein. Tämäkin on liikenteen seurantaverkoksi kohtalaisen harva, mutta lisäinformaatiota on mahdollista saada liikennevaloista ja mahdollisesta matka-aikamittauksesta.

Suurin osa Suomen päätieverkosta on sekaliikennetietä. Liikenne on pääsääntöisesti sujuvaa ja ruuhkat, jotka aiheutuvat lähinnä häiriöistä tai viikonloppujen ja loma-aikojen ylikysyntätilanteista, ovat lyhytaikaisia ja niiden vaikutus kokonaismatka-aikaan on melko pientä. Liikenteen seurantapistettä on erittäin harvassa, samoin liikennevaloja. Valtakunnallisessa liikenteen seurannan yleissuunnitelmassa (Tiehallinto 2002) on esitetty LAM-pisteitä sijoitettavaksi 5–40 km välein siten, että ruuhkautuvilla tiejaksoilla seurantaa on tiheämmässä kuin tiejaksoilla, joilla ruuhka on harvinaista. Korkeimmalla laatutasolla keskimääräinen mittauspisteiden välimatka on noin 10 km. Matalammalla laatutasolla mittauspisteitä on keskimäärin 25...55 km välein. Mittauspisteiden pitkän välimatkan takia linkkien liikennetilanteen arviointi on vaikeaa. Toisaalta ongelmatilanteetkin ovat harvinaisia, joten suuria investointeja liikenteen seurantaan ei kannattane tehdä. Tällaisissa tilanteissa liikennetilanteen arvioimisessa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi historiatietoja sekä suoraa matka-aikojen mittausta.

Tiehallinnon liikenteen automaattiset mittauspisteet eli LAM-pisteet on nykyisin sijoitettu pääosin liittymävaiheiden keskivaiheille. Tulevaisuudessa niitä saatetaan kuitenkin ainakin moottoriväylillä ja eritasoliittymäverkolla sijoittaa enemmän liittymien tuntumaan. Ilmaisinten tarkempaa sijoittamista liittymään ei ole vielä ratkaistu. Ilmaisimen optimaalinen paikka riippuu paljon seurattavan tiejakson ja sillä esiintyvien liikennetilanteiden erityispiirteistä sekä siitä, mitä tietoja liikennetilanteen arviointia varten ensisijaisesti tarvitaan. Tämän ovat todenneet neuroverkkotutkimusten yhteydessä myös Innamaa ja Pursula (2000). Pistemittauksella on tähän asti seurattu lähinnä pistenopeuksia ja liikennemääriä. Nopeusmittausta varten ilmaisimet tulisi sijoittaa paikkaan, jossa pistenopeus parhaiten edustaa linkin matkanopeutta. Lyhyillä ja liikenteellisiltä sekä geometrisilta ominaisuuksiltaan homogeenisilla linkeillä voidaan koko linkin liikennetilanne päätellä kohtuullisen luotettavasti yhden pistemittauksenkin perusteella, jos ilmaisin on sijoitettu edustavasti.

Simulointitulosten perusteella voidaan sanoa, että liikenteellisesti ja geometrisesti tasalaatuisella linkillä voidaan yhden pisteen liikennetilannearvio yleistää kohtuullisella luotettavuudella koko linkille. Jos linkki on useita kilometrejä pitkä tai sillä on häiriö, voi yhden mittauspisteen perusteella arvioitu liikennetilanneluokka kuitenkin olla virheellinen.

Innamaa (1999) on todennut, että tieosakohtaiset suureet, kuten liikennetiheys ja matkanopeus sopivat pistekohtaisia suureita paremmin kuvaamaan

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

liikennetilannetta ja niiden estimointiin olisi tarpeen kehittää yksinkertaisia menetelmiä. Luvussa 6.3 todettiin, että pistemittauksen avulla voidaan seurata myös liikennetiheyttä ja sitä kautta matkanopeutta käyttämällä jatkuvuusyhtälöä ja liikennevirtamallia, kunhan ilmaisimet on sijoitettu niin, että niillä voidaan mitata kaikki tieosalle tuleva ja siltä poistuva liikenne. Innamaa (2002) on todennut, että tieto tiejaksolle tulevasta ja siltä poistuvasta liikennemäärästä parantaisi luultavasti myös lyhyen ajan ennusteiden tekoon käytettyjen neuroverkkojen tulosta.

Varsinaisen liikenteen seurantaan varten rakennetun mittauspisteverkoston lisäksi myös muut järjestelmät kuten liikennevalot ja väyläohjausjärjestelmät sisältävät runsaasti erilaista liikenteen seurannan laitteistoa. Näiden keräämä tieto kannattaisikin hyödyntää myös liikennetilanteen arvioinnissa, jotta välttytään turhilta investoinneilta ja päällekkäisiltä järjestelmiltä, ja toiminta on mahdollisimman kustannustehokasta. Ongelmana on tällä hetkellä eri järjestelmien rajapinnat, jotka eivät mahdollista tiedon hyödyntämistä järjestelmän ulkopuolella helposti ja taloudellisesti.

Tämän hetkinen liikenteen seuranta on puutteellista myös siltä osin, että laitteiden vikaantumiseen ei kiinnitetä tarpeeksi huomiota. Jos seurantalaitteisto vioittuu, se tulisi korjata mahdollisimman nopeasti. Ilman luotettavaa seurantatietoa liikennetilanteen arviointi ei onnistu. Ongelmaan tulisi kiinnittää erityistä huomiota, mikäli ajantasaista sujuvuustietoa halutaan tuottaa. Järjestelmä ei näyttäydy tienkäyttäjälle luotettavana, jos toimintakatkokset tai virheellinen informaatio ovat yleisiä. Osa menetelmistä (kuten datafuusiomenetelmät) saattaa estimoida liikennetilanteen kohtuullisen hyvin osittain puutteellisistakin lähtötiedoista, mutta laadukas seurantatieto on kuitenkin luotettavan sujuvuustiedotuksen perusta.

Liikennetilanteen arviointiin käytettävä menetelmä saattaa tarvita lähtötiedon esimerkiksi minuutin tai jopa pidemmän ajan yhdistettynä tietona. Pidemmän aikavälin käyttö vähentää satunnaisvaihtelusta johtuvaa kohinaa. Toinen vaihtoehto on laskea lähtötiedoista liukuvaa keskiarvoa tai tasoittaa tietoja esimerkiksi eksponentiaalista tasoitusta käyttämällä. Mitä pidempi päivitysväli valitaan tai mitä enemmän havaintoja tasoitetaan, sitä enemmän sujuvuustieto luonnollisesti myös viivästyy. Sopivan päivitysvälin valitseminen onkin kompromissin tekemistä tiedotuksen ajantasaisuuden ja estimaattien satunnaisvaihtelun tasaamisen välillä. Tässä työssä esimerkiksi neuroverkoilla käytettiin päivitysvälinä kahta minuuttia. Lopputulosta oli kuitenkin vielä tasoitettava liiallisen vaihtelun poistamiseksi, joten pidemminkin päivitysvälin käyttö olisi saattanut olla perusteltua.

Vaikka menetelmät saattavat tarvita pidemmän aikavälin yhdistettyä lähtötietoa, liikenteen seurannan tiedot olisi hyvä saada käyttöön mahdollisimman ajantasaisesti ja yksityiskohtaisesti (on-line). Mahdollinen summaus voidaan tehdä ennen kuin tieto viedään menetelmään. Jokaisen havainnon saaminen käyttöön välittömästi parantaa liikennetilanteen arviointiin käytettävien menetelmien mahdollisuuksia ja menetelmien kehittämisen liikkumavaraa. Sujuvuusarvioita on kuitenkin mahdollista tehdä myös esimerkiksi minuutin yhdistetystä lähtötiedosta, mikäli lähtötietoa ei saada käyttöön jokaisen havainnon jälkeen, vaan tiedot viedään tietokantaan kootusti tietyn ajan välein.

Liikenteen seurannan kehittäminen ja seurantaverkoston tihentäminen niillä alueilla, joissa sujuvuustiedotuksesta olisi eniten hyötyä, on avainasemassa

laadukkaiden liikennetilannearvioiden tuottamisessa. Toisaalta sujuvuustiedotuksen tapauksessa liikennetilanne-estimaatin ei tarvitse olla aivan tarkka, koska liikennetilanteesta tiedotetaan viisiportaisella liikennetilanneluokalla. Maailmalla käytössä olevissa palveluissa luokitus on jopa kolmiportainen, jolloin virheellisen tiedon esittäminen harvaankin seurantaverkostoon perustuen käy epätodennäköisemmäksi. Suomessa nykyisenlaajuisellakin liikenteen seurannalla sujuvuustiedon luotettavuutta voidaan parantaa käyttämällä sujuvuusarviointiin pistenopeuden lisäksi muita saatavilla olevia tietoja. Jo liikennemäärä- ja varausastetiedon yhdistäminen pistenopeustietoon todennäköisesti parantaa liikennetilannetiedotuksen luotettavuutta.

Lupaavimmilta menetelmiltä liikennetilanteen arviointiin Suomessa tuntuvat erilaiset datafuusiomenetelmät. Varsinaista liikenteen seurantaa ei ole kovin tiheässä ja datafuusiomenetelmien avulla voidaan yhdistää eri lähteistä saatavaa tietoa. Maailmalla olemassa olevista liikennetilannetiedotukseen käytettävistä järjestelmistä kannattaisi ottaa mallia ja perehtyä tarkemmin niissä hyödynnettävään lähtötietoon.

Sujuvuuden mittarina käytetään nykyisin vallitsevan nopeustason poikkeamaa vapaasta nopeudesta. Tämänkin työn simulointitutkimuksessa sujuvuutta mitattiin matkanopeuden avulla. Sujuvuuden mittaria voisi kuitenkin kehittää ja nopeustasoon voisi yhdistää esimerkiksi liikennetiheyden. Liikennetiheys, eli tietyllä tiejaksolla olevien ajoneuvojen määrä kuvaa suoraan liikennetilannetta ja vaikuttaa myös tiejakson matkanopeuteen. Liikennetiheyden arvioiminen ei kuitenkaan ole matkanopeuden arvioimista helpompaa.

Sujuvuusmittarin lisäksi myös tiedotuksen tarkkuus vaatii kehittämistä. Käytetäänkö tiedotuksessa linkkinä pääliittymäväliä vai tulisiko kaikki liittymävälit erottaa omiksi linkeikseen? Entä miten tiedotusta annetaan, jos linkki itsessään ei ole ruuhkautunut, mutta sujuvuusongelmia on esimerkiksi liittymässä, johon linkki päättyy. Tämänkaltaisen tiedotuksen kannalta vaikea tilanne on esimerkiksi Espoossa Turunväylän ja Kehä I:n liittymässä.

7.8 Jatkotutkimusaiheet

Tutkimuksessa käytettiin hyvin yksinkertaista kahden linkin simulointimallia. Vaikka menetelmien tulokset olivat tällä mallilla ja testatuilla liikennetilanteilla (lukuun ottamatta häiriötilanteita) varsin hyviä, on muistettava, että erilaisella tiegeometrialla ja toisenlaisilla liikennetilanteilla tulos ei välttämättä ole sama. Liikennetilanteen arviointimenetelmiä tulisi testata monimutkaisemmalla liikenneympäristöllä.

Menetelmien hyvät ja huonot puolet tulevat kunnolla esiin vasta kenttäkokeessa. Liikennetilanteen arviointiin soveltuvia menetelmiä tulisi testata oikealla, maastossa mitatulla liikennetiedolla. Tätä varten tarvittaisiin koealue, jolta olisi saatavilla mahdollisesti erilaista lähtötietoa. Koealueita voisi olla erityyppisissä liikenneympäristöissä useita, jotta menetelmien soveltuvuus eri ympäristöihin tulee esille.

Kenttäkokeessa tulisi tutkia eri ilmaisinsijoittelun vaihtoehtoja. Näin saataisiin tietoa siitä, missä kohdassa pistemittaus edustaa linkin liikennetilannetta parhaiten. Jos liikennetilanteen arviointiin käytetään pelkkää pistemittaus-

PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

saattaisi olla kannattavaa seurata sekä pistenopeutta että liikennemäärää ja perustaa sujuvuusluokka näiden tietojen yhdistelmälle. Liikennemäärän mittaaminen tuo lisävarmuutta pelkän nopeustiedon käyttöön verrattuna. Jos linkki esimerkiksi päättyy välityskyvyltään alhaiseen liittymään, voidaan liikennemäärämittauksen avulla saada lisätietoa siitä, koetellaanko liittymän välityskyvyn rajoja. Pistenopeuksien hajonnan käyttöä yhtenä lähtötietona kannattaisi myös tutkia. Vapaassa tilanteessa pistenopeudet ovat yleensä lähellä toisiaan, mutta kun liikenne on muuttumassa epävakaa, pistenopeuksien hajonta kasvaa.

Tässä työssä käytettiin liikennetilanteen arvioinnin lähtötietoina pistemittaus-tietoa ja matka-aikamittauksia. Erilaisen lähtötiedon merkitystä kannattaisi tutkia. Erityisen kiinnostavaa olisi tutkia, miten anturiajoneuvoilta saatava tieosakohtainen tieto vaikuttaisi liikennetilannearvioiden luotettavuuteen. Matka-aikamittauksen ongelmana on se, että seurantajaksot ovat usein pitkiä eikä kohonneen matka-aikatiedon perusteella tiedetä, mikä seurantajakson osa on ruuhkautunut. Matka-aikamittaukseen voisi yhdistää pistetietoa, jonka perusteella kyettäisiin mahdollisesti päättämään ruuhkautunut osa.

Liikennevaloista saatavan tiedon hyödyntämistä kannattaisi tutkia tarkemmin. Liikennevaloliittymien ilmaisinten mittaamista lähtötiedoista käyttökelpoisimpia olisivat todennäköisesti liikennemäärä-, aikaväli- ja varausastetiedot. Palacharla ja Nelson (1999) havaitsivat tutkimuksessaan (ks. luku 3.3.6), että liikennevaloliittymien ilmaisimilta saatavat varausastetiedot kuvasivat liikennetilannetta liikennemäärätietoja paremmin. Liikennemäärätietoja voitaisiin kuitenkin hyödyntää esim. ajantasaisessa simuloinnissa tai liikennevirtamallissa. Liikennevalojen ohjaustietoja (esim. toteutunutta kiertoaikaa ja eri vaiheiden pituuksia) voitaisiin mahdollisesti myös hyödyntää liikennetilanteen päättelyssä.

Sää- ja kelitietojen hyödyntämistä ei voitu tässä työssä tutkia, koska menetelmiä tutkittiin simuloitulla liikennetiedolla. Kenttäkokeessa sää- ja kelitietojen käyttöä kannattaa tutkia, sillä Suomessa säällä ja kelillä on usein merkittävä vaikutus liikenteen sujuvuuteen.

Ajantasaisen seurantatiedon lisäksi liikennetilannearvioiden tekemisessä olisi hyvä tutkia historiatiedon hyödyntämistä, koska liikennetilanteet toistuvat pitkälti samanlaisina samoina viikonpäivänä samaan kellonaikaan. Liikenteen kausivaihteluminen voitaisiin hyödyntää kehittämällä laadukas ja kattava historiatietokanta.

Liikennevirtamalliin ilmaisinvirheistä aiheutuvan kumuloituvan virheen korjaamista kokeiltiin tässä työssä kahdella pistemittauksella ja päättelysääntöihin perustuvalla tekniikalla. Korjaustekniikoiden päättelysääntöjä tulisi vielä kehittää, jotta ne toimisivat mahdollisimman hyvin erilaisissa liikennetilanteissa. Yhtenä vapaan liikennetilanteen kriteerinä voitaisiin käyttää tietoa linkin alussa ja lopussa mitattujen liikennemäärien erosta. Esimerkiksi kun linkillä on paikallinen häiriö eikä liikennetilanne ole vapaa, liikennemäärä linkin lopussa on linkin alun liikennemäärää pienempi.

Liikennevirtamallin kumuloituvaa virhettä voitaisiin mahdollisesti korjata myös esim. neuroverkkojen avulla. Ilmaisimen varausastetietoja hyödyntämällä virhettä voitaisiin yrittää korjata jatkuvasti myös Kalman-suotimen avulla. Kalman-suotimessa yhdistetään mallin (tässä jatkuvuusyhtälö) ja mittauk-

sen (tässä ilmaisimen varausasteen perusteella saatu liikennetiheys) antama tulos niiden luotettavuuden suhteessa. Vaikeudeksi saattaa muodostua mallin ja mittauksen luotettavuudesta kertovien kovarianssien määrittäminen.

Tässä työssä neuroverkkojen syöteinä käytettiin linkin alussa ilmaisimittain mitattuja pistetietoja ja kaksi linkkiä osittain kattavaa matka-aikamittausta. Neuroverkkojen toimintaa erilaisilla syötetiedoilla kannattaisi tutkia. Myös syötetiedon esikäsittelymenetelmiin kannattaa perehtyä tarkemmin.

Tässä työssä neuroverkkomenetelmänä käytettiin radiaalikantafunktioneuroverkkoja (RBF). RBF-neuroverkkojen käytäntöön soveltamisen huonona puolena on ohjattuun opetukseen perustuva opetusprosessi, joka vaatii paljon laadukasta mittaustietoa sekä tiedon oikeasta sujuvuustasosta, jonka mittaaminen maastossa on hankalaa. Ohjaamattoman oppimisen neuroverkkomenetelmä (kuten itseorganisoituva kartta) voisivat olla ratkaisu tähän ongelmaan.

Mielenkiintoinen ajatus on myös hyödyntää neuroverkon opetusprosessissa simulointimallia. Mikäli käytettävissä olisi hyvin validoitu ja kalibroitu simulointiohjelma, neuroverkon opettaminen saattaisi onnistua simulointimallia käyttämällä. Tällöin tarkasteltavasta alueesta toteutettaisiin simulointimalli ja mallia ajettaisiin useilla erilaisilla liikennetilanteilla. Mallista mitattaisiin lähtötietoja ja toteutuneita matkanopeuksia, jotka syötettäisiin opetusprosessissa neuroverkolle. Mikäli mallinnus onnistuisi tarpeeksi hyvin, osaisi neuroverkko antaa oikeita estimaatteja maastoon siirrettynä. Simulointimallin käyttö nopeuttaisi opetusprosessia, koska simuloinnissa voidaan helposti luoda tilanteita, joita maastossa esiintyy harvoin.

Eri menetelmien yhteiskäyttöä kannattaa tutkia. Kirjallisuustutkimuksessa ilmeni, että monessa tutkimuksessa yhdistetään sumeaa logiikkaa ja neuroverkkoja. Mahdollista olisi myös käyttää tiettyä mallia tietyssä tilanteessa ja vaihtaa menetelmää, kun tilanteen havaitaan muuttuvan. Toinen vaihtoehto on estimoida liikennetilanne usealla menetelmällä samanaikaisesti ja painottaa menetelmien tuottamia estimaatteja kertoimilla, jotka kuvaavat kyseessä olevien menetelmien luotettavuutta.

Suomen tämän hetkiselä liikenteenseurantaverkostolla kannattaisi tutkia jonkinlaisen asiantuntijajärjestelmän käyttöä liikennetilanteen arvioinnissa. Asiantuntijajärjestelmissä yhdistetään erilaista lähtötietoa. Liikennetilanteen päättelyyn käytetään esim. kokeneiden liikenneinsinöörien ja liikennekeskusten päivystäjien asiantuntemusta, joka on asiantuntijajärjestelmässä muutettu erilaisiksi päättelysäännöiksi, joiden avulla liikennetilanne päätellään.

Maaillalla on useita kaupunkeja, jotka antavat liikennetilannetiedotusta mm. Internetissä. Olemassa oleviin järjestelmiin tulisi perehtyä tarkemmin ja muualla saatuja kokemuksia tulisi hyödyntää liikennetilanteen arviointiin sopivan menetelmän kehittämisessä.

LÄHDELUETTELO

Airaksinen N., Ellmèn P. (2003). *Sujuvuustietopalvelun tarpeen arviointi*. Tiehallinnon sisäisiä selvityksiä 1/2003. Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Helsinki. 64 s.

Antoniou C. (1997). *Demand Simulation for Dynamic Traffic Assignment*. Master's Thesis in Transportation at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139. <http://web.mit.edu/its/papers/AntoniouMS.pdf>. 118 s.

van Arem B., van der Vlist M.J.M. (1994). *Travel Time Estimation in the GERDIEN Project*. Second DRIVE-II Workshop on Short-Term Traffic Forecasting. November 1994. 22 s.

Bosch Signalbau Huber (1998). E18 Nummi, Järjestelmäkuvaus. Versio 1.0. 110 s.

Choi D.B., Ko H.S., Ahn, B.H. (1998). *On Multisensor Data Fusion using Attribute Association for Intelligent Traffic Congestion Information Inference*. 5th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October, 1998, Seoul, Korea. ITS Congress Association. 8 s. (CD-ROM)

Choi K., Lee S.-H. (1997). *Data Fusion for Generating the Link Travel Times with Insufficient Traffic Data Sources*. 4th World Congress on Intelligent Transport Systems, 12 – 16 October, 1998, Seoul, Korea. ITS Congress Association. 8 s. (CD-ROM)

Coifman, B. (2001). *Identifying the Onset of Congestion Rapidly with Existing Traffic Detectors*. Paper presented at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2001. TRB 2001 Annual Meeting. 28 s. (CD-ROM)

Cortes, E.C., Lavayana, R., Oh, J.-S. & Jayakrishnan, R. (2002). *A General Purpose Methodology for Link Travel Time Estimation Using Multiple Point Detection of Traffic*. Paper presented at the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2002. TRB 2002 Annual Meeting. 27 s. (CD-ROM)

Daganzo C.F. (1995). *Requiem for second-order fluid approximation of traffic flow*. Transportation Research, Part B, Vol. 29B, No. 4, 1995. s. 277-286.

Dailey D.J., Harn P., Lin P.-J. (1996). *ITS Data Fusion*. WA-RD 410.1. Washington State Department of Transportation, Washington, USA. 94 s.

Eloranta T. (1999). *Rekisterikilpien tunnistamiseen perustuva liikenteen automaattinen matkanopeuden seuranta*. Tielaitoksen selvityksiä 46/1999. Uudenmaan tiepiiri, Tielaitos. Helsinki. 149 s.

Elster A., Hübner D. (2002). *Application of Knowledge-Based Techniques in a Traffic Control Centre*. 9th World Congress on Intelligent Transport Sys-

tems, 14-17 October, 2002, Chicago, USA. ITS Congress Association. 10 s. (CD-ROM)

van Grol R., Inaudi D., Kroes E. (2000). *On-Line Traffic Condition Forecasting Using On-Line Measurements and a Historical Database*. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, 6-9 November, 2000, Turin, Italy. ITS Congress Association. 10 s. (CD-ROM)

Haykin S. (1999). *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. International Edition, Second Edition. Prentice Hall International Inc, New Jersey, USA. 842 s.

Hellinga B., Gudapati R. (2000). *Estimating Link Travel Times for Advanced Traveller Information Systems*. Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineers 3rd Transportation Specialty Conference held in London, Ontario June 7-10, 2000. 8 s.

Hintikka J., Göös J. (2003). *Neuroverkot*. VTT Elektroniikka, Älykkäät järjestelmät. <http://www.vtt.fi/ele/tutkimus/ais/aly/neuroverkot.htm> (28.7.2003)

Holma M. (1991). *Kalman-suodatuksen periaatteet ja käyttö liikenneteknisissä mittauksissa ja liikenteen ohjauksessa*. Matematiikan erikoistyö, Teknillinen korkeakoulu. 18 s.

Huisken G., van Maarseveen M. (2000). *Congestion Prediction on Motorways: a Comparative Analysis*. 7th World Congress on Intelligent Transport Systems, 6-9 November, 2000, Turin, Italy. ITS Congress Association. 7 s. (CD-ROM)

Hämeen tiepiiri (2003). *Valtatie 3 – Tampereen läntinen kehätie*. Esite, Tiehallinto. 6 s.

Innamaa S. (2002). *Matka-ajan lyhyen aikavälin ennustemalli – Kokeiluversio*. Tiehallinnon selvityksiä 22/2002. Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 48 s.

Innamaa S., Lanne L., Vanhanen K., Pursula M. (2002). *Pääteiden lyhyen aikavälin matka-aikaennusteet*. Tiehallinnon selvityksiä 5/2002. Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 81 s. + liitteet.

Innamaa S., Pursula M. (2000). *Liikennemäärän ja nopeuden lyhyen aikavälin ennustaminen*. Tielaitoksen selvityksiä 54/2000. Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 105 s. 105 s.

Innamaa S. (1999). *Automaattiset liikenteenohjaus- ja liikenneinformaatiojärjestelmät*. Tielaitoksen selvityksiä 28/1999. Tielaitos, Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 136 s.

Kiljunen M., Summala H. (1996). *Ruuhkaisuuden kokeminen ja liikennetilantiedottaminen – Tienkäyttäjätutkimus kaksikaistaisilla teillä*. Tielaitoksen selvityksiä 25/1996. Tielaitos, Keskushallinto, Helsinki. 85 s.

Klein L.A. (2001). *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*. Artech House ITS Library, Boston. 549 s.

LÄHDELUETTELO

- Koikkalainen P., Oja E. (1994). *Neurolaskennan mahdollisuudet*. Tekes-raportti 43/94. http://www.tekes.fi/julkaisut/raportit/43_94/ (15.10.2003)
- Korpisaari P. (2001). *Studies on Data Fusion Techniques for Multitarget Tracking*. Tampere University of Technology. Publications 329. Tampere. 166 s.
- Kosonen I., Kulmala R., Hautala R. (2004). *DigiTraffic – Liikenteen mallin-
nus- ja palvelujärjestelmä*. Esiselvitys. Fits-julkaisuja 30/2004, Liikenne- ja
viestintäministeriö, Helsinki. (Julkaistaan alkuvuodesta 2004)
- Kosonen I. (1999). *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model:
Principles and Applications*. Teknillinen Korkeakoulu, Liikennetekniikka. Jul-
kaisu 100. Espoo. 249 s.
- Kummala J. (2002). *Matkapuhelimia hyödyntävä matka-aikapalvelu – Järjes-
telmän arviointi – Tulokset*. Tiehallinnon selvityksiä 55/2002. Tiehallinto, Lii-
kenteen palvelut, Helsinki. 80 s.
- Kummala J., Kulmala R., Hautala R., Oinas J., Holm C. (2001). *Matkapuhe-
linpaikannuksen hyödyntäminen liikennetietojen keruussa – Esiselvitys*. Tie-
hallinnon selvityksiä 61/2001. Tiehallinto, Liikenteen palvelut, Helsinki. 52 s.
- Logi, F., Ullrich, M., Keller, H. (2002). *A Dynamic Approach to Online Traffic
Modeling in the Munich Metropolitan Network*. Paper presented at the 81st
Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.,
January 2002. TRB 2002 Annual Meeting. 18 s. (CD-ROM)
- Luoma S., Karhumäki T. (2002). *Liikenteen sujuvuuden mittaaminen matka-
puhelimien avulla*. Väylät ja Liikenne 2002, Esitelmät, Jyväskylä, 9-
10.10.2002. Suomen Tieyhdistys. s 152-155.
- Luoma S. (1998). *Tieliikenteen sujuvuus ja sen mittaaminen*. Tielaitoksen
selvityksiä 21/1998. Tielaitos, Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Helsinki. 101
s.
- Lähesmaa J., Nyberg L., Pilli-Sihvola Y. (2002). *Tie- ja ympäristöolosuhte-
iden seurannan tavoitetilan 2005 esiselvitys*. Tiehallinnon selvityksiä
10/2002. Tiehallinto, Kaakkois-Suomen tiepiiri, Kouvola. 51 s.
- Manstetten D., Maichle J. (1996). *Determination of Traffic Characteristics
Using Fuzzy Logic*. 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems, 14
– 18 October, 1996, Orlando, USA. ITS Congress Association. 11 s. (CD-
ROM)
- May A.D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. University of California, Berke-
ley. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 464 s.
- Nanthawichit C. (2003). *Dynamic Estimation of Traffic States on Expressway
for Advanced Traffic Surveillance Systems*. A doctoral dissertation. Trans-
portation and Traffic Systems Engineering, Graduate School of Engineering,
Hokkaido University. 185 s.

Norwegian Public Roads Administration (1999). *Final report – Traffic Info Gardermoen*. Research project Dynamic data for road transport. Road Transport and Safety Department. TTS-7-1999.45 s.

Offermann F. (2001). *Fusion of Local Traffic Data and Floating Car Data for Travel Speed Estimation by a Neuro Fuzzy Approach*. 8th World Congress on Intelligent Transport Systems, 30 September – 4 October, 2001, Sydney, Australia. ITS Congress Association. 10 s. (CD-ROM)

Oh J-S., Jayakrishnan R., Recker W. (2002). *Section Travel Time Estimation from Point Detection Data*. www.its.uci.edu/its/publications/papers/WP-02-11.pdf. (12.5.2003)

Palacharla P.V., Nelson P.C. (1999). *Application of fuzzy logic and neural networks for dynamic travel time estimation*. International Transactions in Operational Research 6. 15 s.

Papageorgiou M. (2003). 5th Short Course on Dynamic Traffic Flow Modelling and Control, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, 9-13 June 2003, Chania, Greece. Lecture transparencies

Papageorgiou M. (1998). *Some Remarks on Macroscopic Traffic Flow Modelling*. Transportation Research, Part A, Vol. 32, No.5, 1998. 7 s.

Perrin J., Martin P.T., Coleman B. (2003). *Monitoring Commuter Congestion on Surface Streets in Real-Time*. Paper presented at the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., January 2002. TRB 2002 Annual Meeting. 17 s. (CD-ROM)

Pursula M., Innamaa S. (2001). *Liikennevirran ominaisuudet*. Teknillisen korkeakoulun kurssin Yhd-71.145 Liikennevirran ominaisuudet opetusmoniste. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 149 s.

Pursula M. (2000). *Soluautomaatit liikennevirtamallinnuksessa*. Väylät ja Liikenne 2000, Esitelmät, Hämeenlinna, 4-5.10.2000. Suomen Tieyhdistys. s. 517-522.

Pursula M. (1995). *Sumeat joukot ja sumeat menetelmät liikennetekniikassa*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennetekniikka, Opetusmoniste 14. Otaniemi. 192 s.

Pursula M. (1982). *Liikenteen simulointi*. Teknillinen korkeakoulu, Liikennelaboratorio, opetusmoniste 5, Espoo. 28 s.

Saastamoinen K. (2003). *LAM-oikeellisuustarkastelu*. Tiehallinto. Julkaise-maton muistio. 31 s.

SINTEF (1998). *Dynamiske Data – Demonstrator Gardermoen. Algoritme for traffikkavvikling*. SINTEF Bygg og miljøteknikk. 19 s.

Tiehallinto (2003a). Tiehallinnon internetsivut. Liikenteen tiedotus, liikenne. <http://www.tiehallinto.fi/alk/frames/liikenne-frame.html>

LÄHDELUETTELO

Tiehallinto (2003b). *Liikennetilannetiedon hallinnan kehittäminen*. Julkaise-maton muistio.

Tiehallinto (2002). *Valtakunnallinen liikenteen seurannan yleissuunnitelma*. Tiehallinnon selvityksiä 58/2002. Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Helsinki. 101 s. + liitteet.

Tiehallinto (2001). *Liikenteen seurannan valtakunnallinen esiselvitys*. Tiehal-linnon selvityksiä 19/2001. Tiehallinto, Liikenteen palvelut. Helsinki. 55 s.

Tielaitos (2000). *Lahti – Heinola matka-aikajärjestelmän toiminnallinen arvi-ointi*. Tielaitoksen selvityksiä 58/2000. Tielaitos, Hämeen tiepiiri. Tampere. 110 s.

Tielaitos (1996). *LIVASU 95. Liikennevalot*. Tielaitos, kehittämiskeskus. Suunnittelua ohjaavat julkaisut, liikennetekniikka. Oy Edita Ab. Helsinki. 210 s.

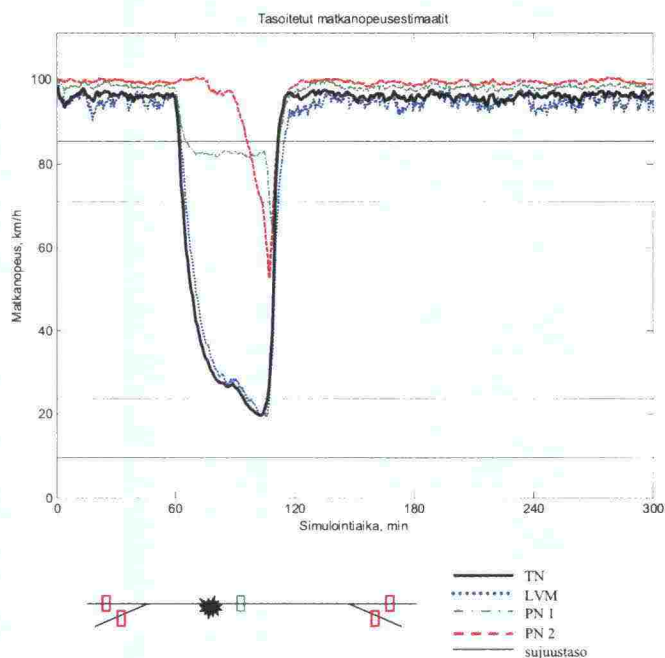
Tielaitos (1993). *Tielaitoksen liikenteen informaatiopalvelujen kehittämistut-kimus*. Tielaitoksen selvityksiä 88/1993. Tielaitos, Keskushallinto, Helsinki. 62 s.

Vortisch P., Möhl P. (2003). *Traffic State Estimation in the Traffic Manage-ment Center of Berlin*. Paper presented at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., January 2003. TRB 2003 Annual Meeting. 9 s. (CD-ROM)

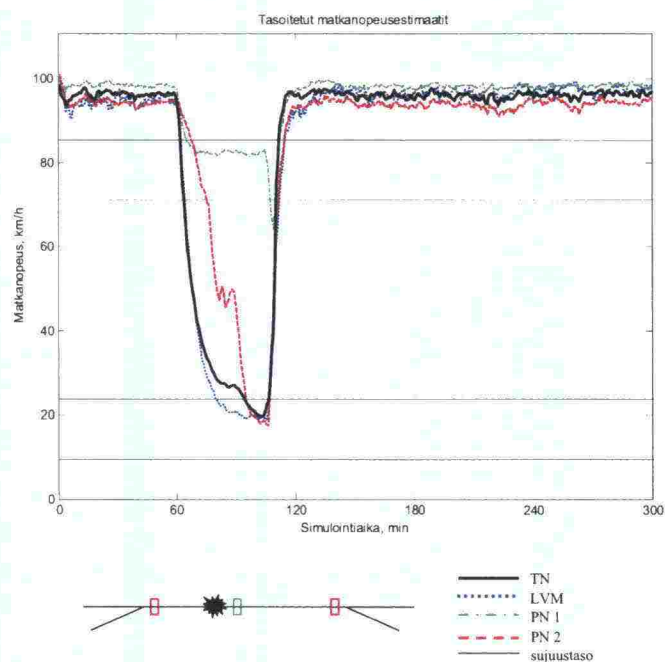
Welch G., Bishop G. (2003). *An Introduction to the Kalman Filter*. The Uni-versity of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science. http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf 16 s. (15.9.2003)

Westerman M. (1995). *Real-Time Traffic Data Collection for Transportation Telematics*. Delft University of Technology, Delft. 266 + 43 s.

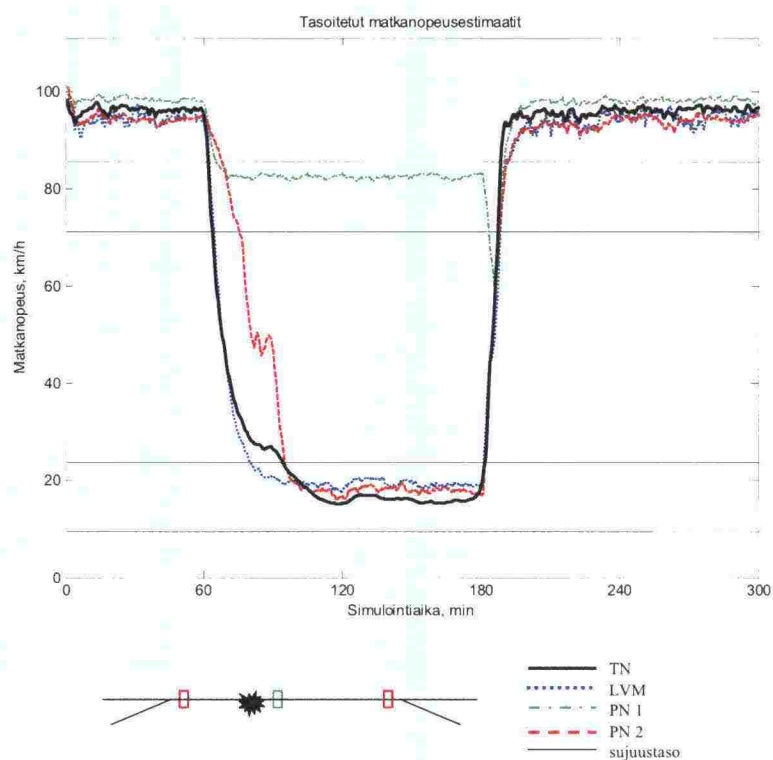
Zou X., Levinson D. (2002). *Criterion Function of Traffic Flow Patterns*. 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, 14 – 17 October, 2002, Chicago, USA. ITS Congress Association. 12 s. (CD-ROM)

LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIALIIKENNEVIRTAMALLIN JA
PISTENOPEUSMENETELMIEN SIMULOINTITULOKSIA

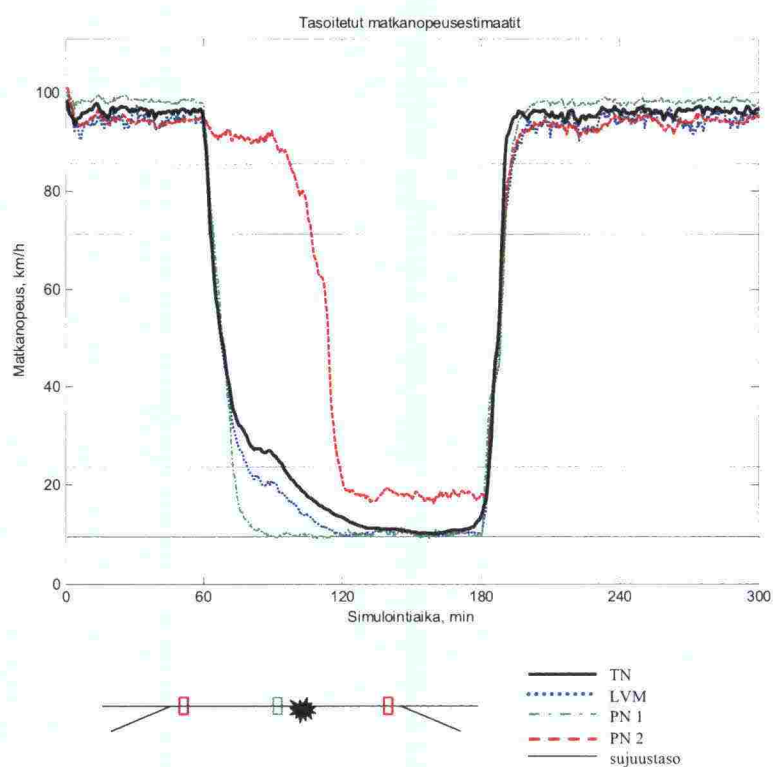
Kuva 1-1. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 1). Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia.



Kuva 1-2. Matkanopeusestimaatit 45 min häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2). Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia.

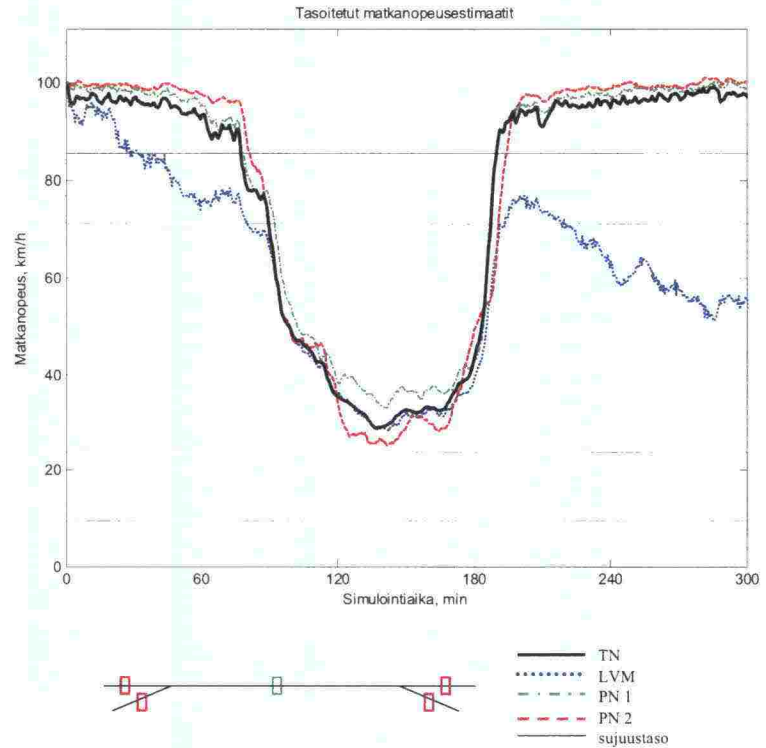


Kuva 1-3. Matkanopeusestimaatit 2 h häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2). Häiriön sijainti ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia.

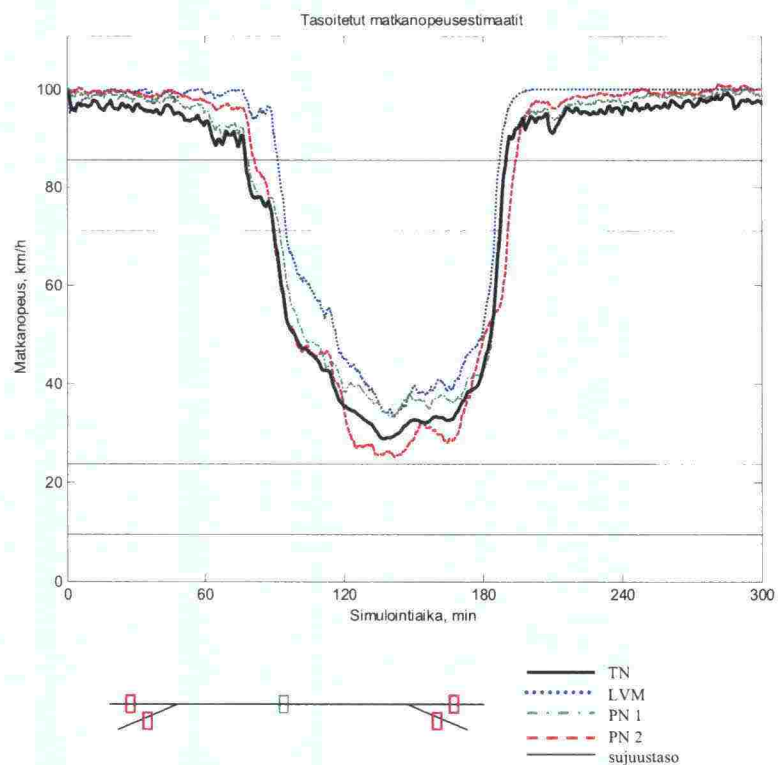


Kuva 1-4. Matkanopeusestimaatit 2 h häiriötilanteessa (ilmaisinsijoittelu 2). Häiriön sijainti linkin keskellä olevan ilmaisimen jälkeen.

LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA

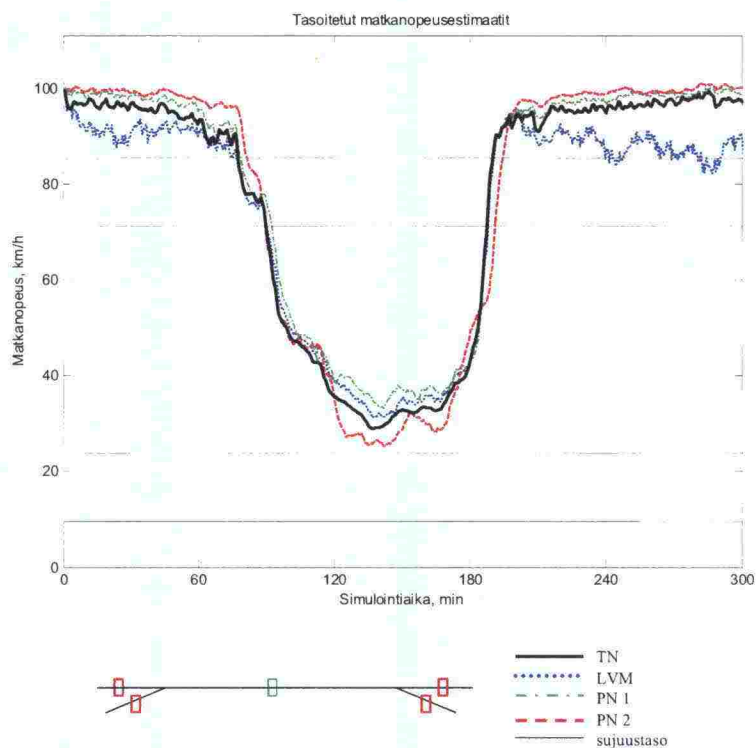


Kuva 1-5. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun kaikissa ilmaisimisissa oli 1 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

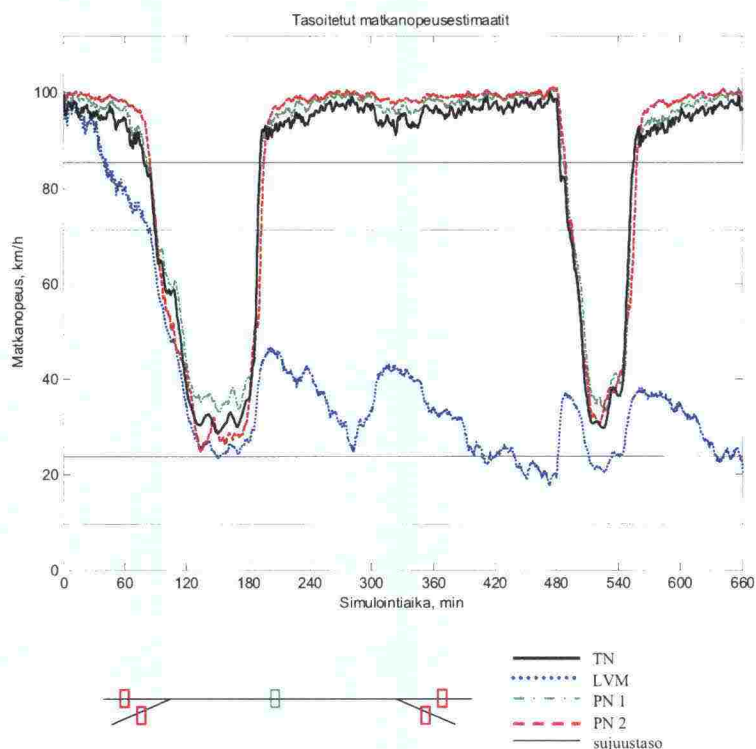


Kuva 1-6. Matkanopeusestimaatit iltaruuhkassa, kun kaikissa ilmaisimisissa oli 1 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA

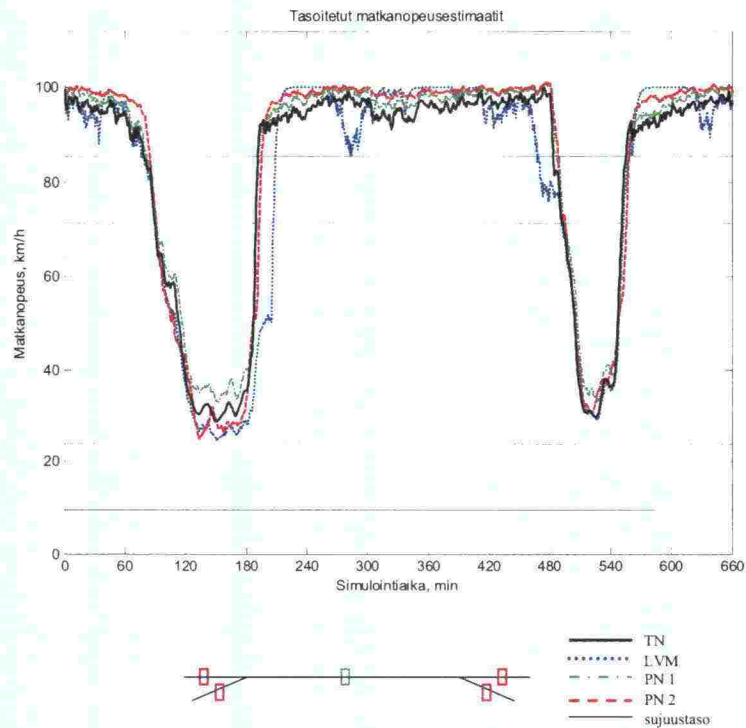


Kuva 1-7. Matkanopeusestimaatit kesäliikenteen iltaruuhkassa, kun kaikissa ilmaisimissa oli 0,5 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

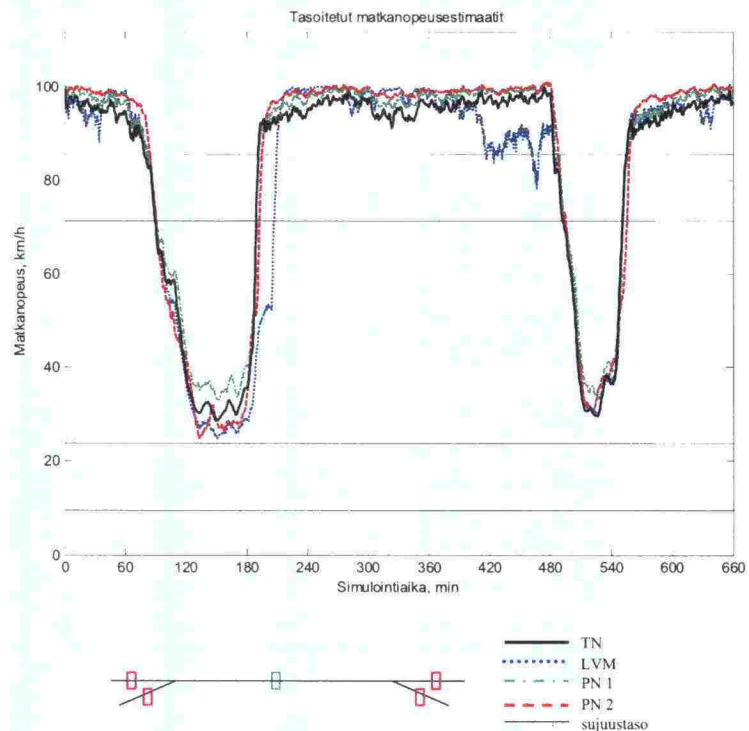


Kuva 1-8. Matkanopeusestimaatit toisessa korjaustapauksessa, kun kaikissa ilmaisimissa oli 1 % virhe (ilmaisinsijoittelu 1).

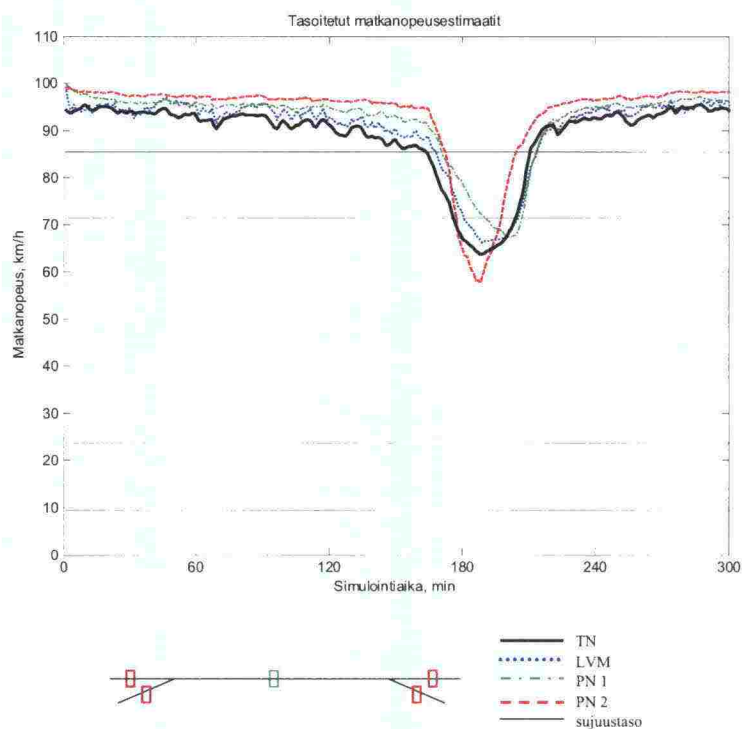
LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA



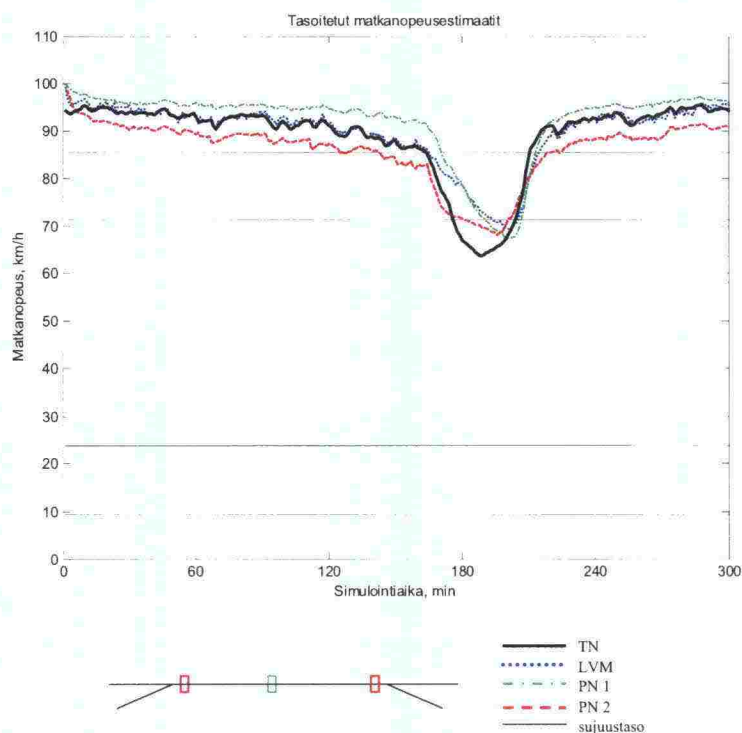
Kuva 1-9. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 1-8. Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu ilmaisimen varausasteen avulla.



Kuva 1-10. Matkanopeusestimaatit samassa tapauksessa, kuin kuvassa 1-8. Liikennevirtamallin estimaattia on korjattu vapaan virran matka-ajan aikana havaittujen ajoneuvomäärien avulla.

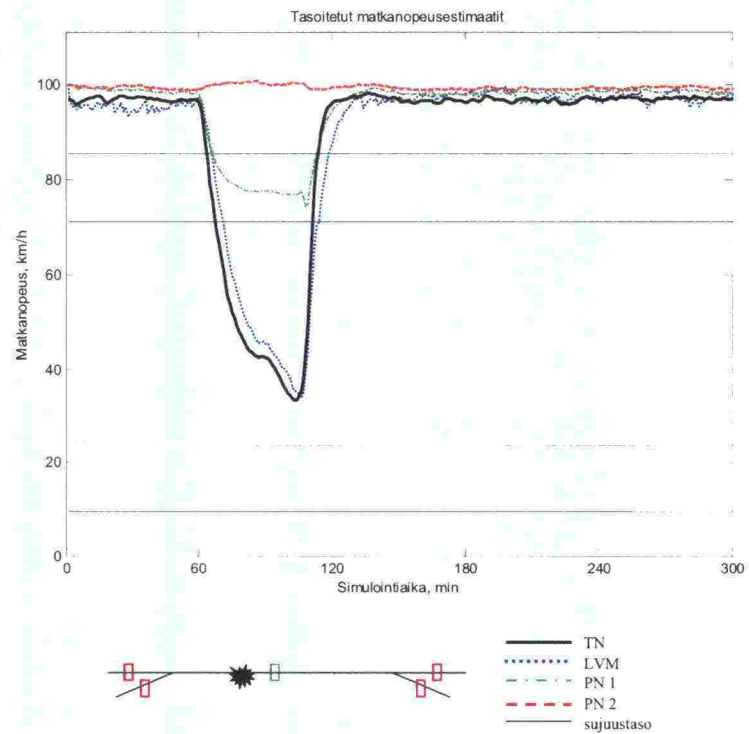
LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA


Kuva 1-11. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee olleen 5-60 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaisinsijoittelu 1).

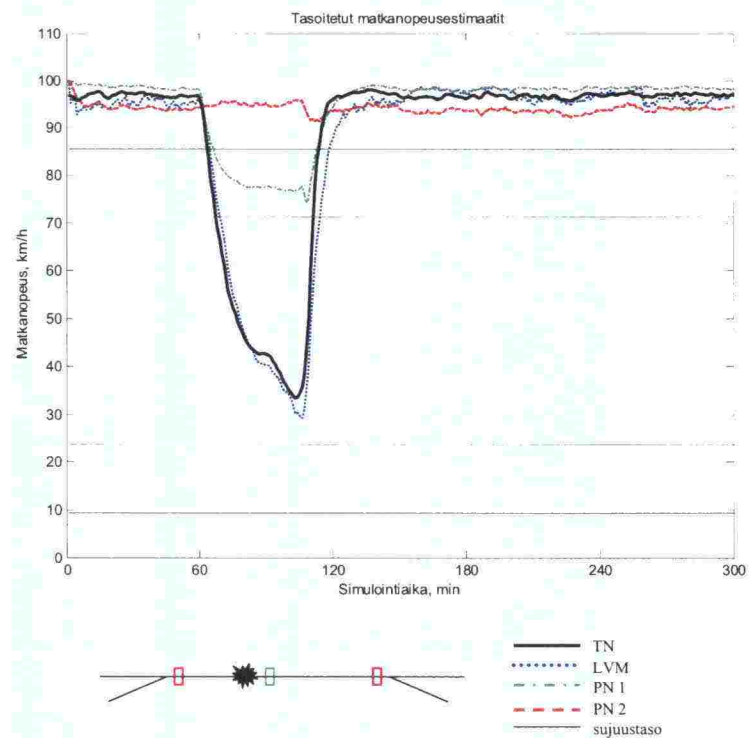


Kuva 1-12. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä, kun rampilta tulevan liikenteen osuus vaihtelee olleen 5-60 % pääsuunnan liikennemäärästä (ilmaisinsijoittelu 2).

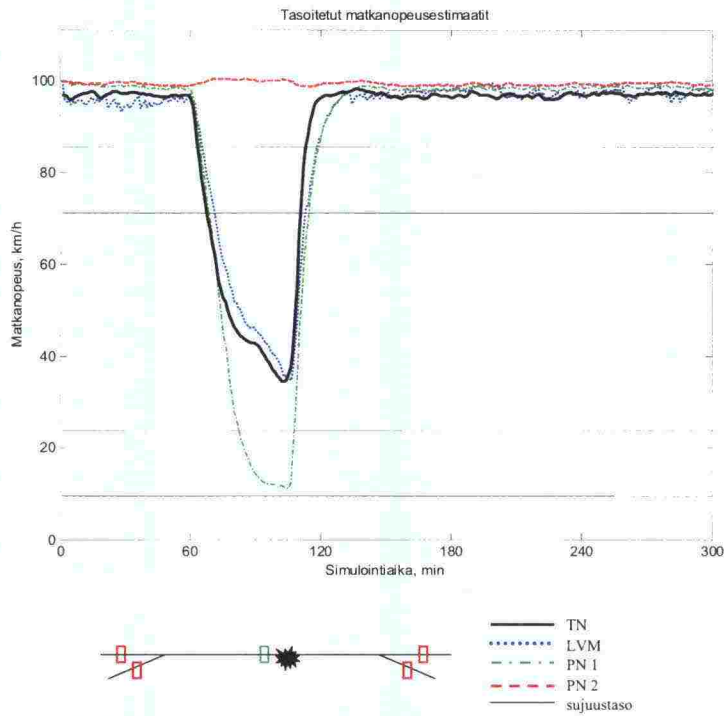
LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA



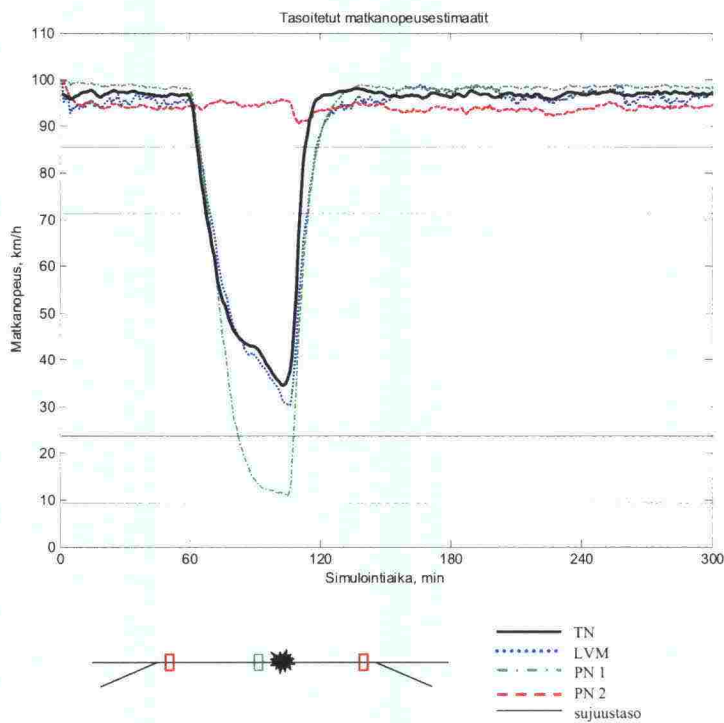
Kuva 1-13. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä 45 min häiriötilanteessa, kun häiriön paikka ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia (ilmaisinsijoittelu 1).



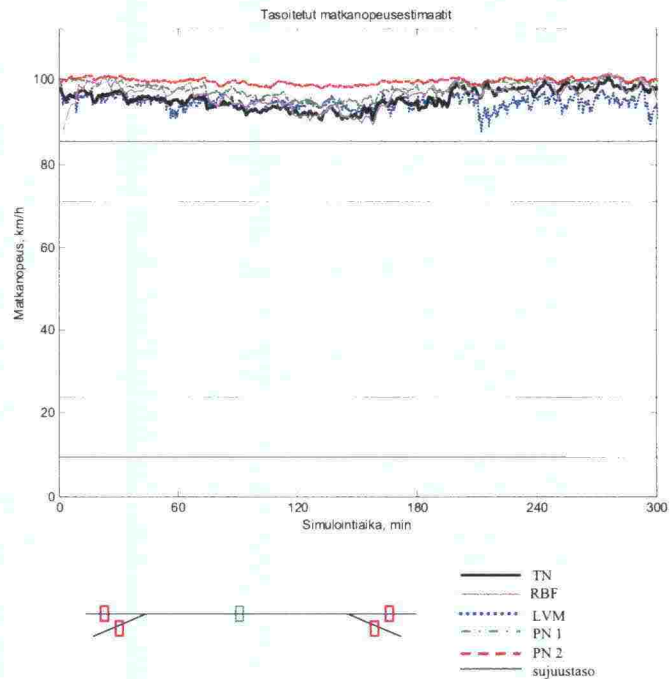
Kuva 1-14. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä 45 min häiriötilanteessa, kun häiriön paikka ennen linkin keskellä olevia ilmaisimia (ilmaisinsijoittelu 2).



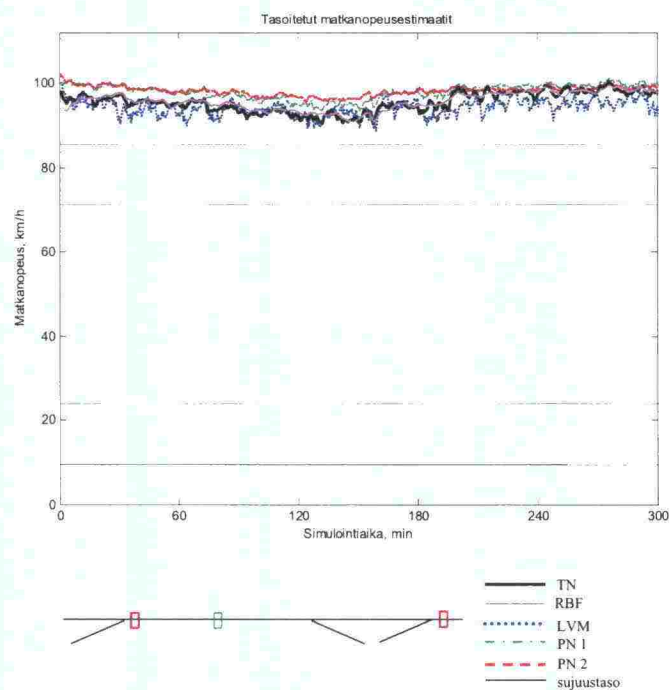
Kuva 1-15. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä 45 min häiriötilanteessa, kun häiriön paikka linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen (ilmaisinsijoittelu 1).



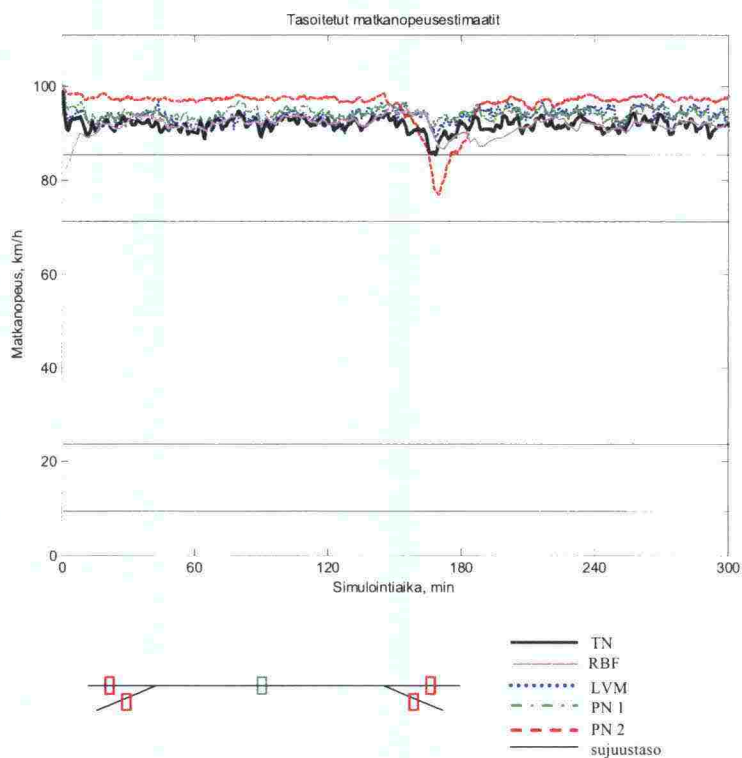
Kuva 1-16. Matkanopeusestimaatit pitkällä linkillä 45 min häiriötilanteessa, kun häiriön paikka linkin keskellä olevien ilmaisinten jälkeen (ilmaisinsijoittelu 2).

NEUROVERKKOJEN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIANEUROVERKKOJEN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA

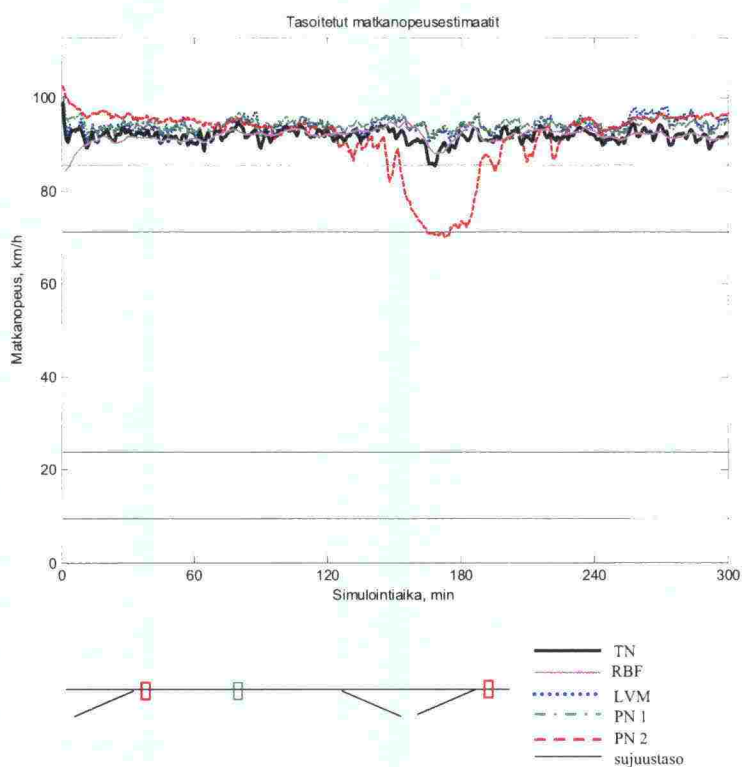
Kuva 2-1. Matkanopeusestimaatit kesäliikenteen iltaruuhkassa, neuroverkko 1.



Kuva 2-2. Matkanopeusestimaatit kesäliikenteen iltaruuhkassa, neuroverkko 2.

NEUROVERKKOJEN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN
SIMULOINTITULOKSIA

Kuva 2-3. Matkanopeusestimaatit, kun toisen linkin ensimmäisestä liittymästä tuleva liikennemäärä vaihtelee, neuroverkko 1.



Kuva 2-4. Matkanopeusestimaatit, kun toisen linkin ensimmäisestä liittymästä tuleva liikennemäärä vaihtelee, neuroverkko 2.

LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN SIMULOINTITULOKSET

Liikennevirtamallin ja pistenopeuteen perustuvien menetelmien simulointitulokset

paras tulos	huonoin tulos					
Tapaus	Yhden mittauspisteen menetelmä	Kahden mittauspisteen menetelmä - ilmaisinsijoittelu 1	Kahden mittauspisteen menetelmä - ilmaisinsijoittelu 2	Liikennevirtamalli - ilmaisinsijoittelu 1	Liikennevirtamalli - ilmaisinsijoittelu 2	Huomioita
Iltaruuhka	Yliarvioi matkanopeuden ruuhkassa n. 5 km/h	Yliarvioi matkanopeuden vapaassa tilanteessa n. 2 km/h ja aliarvioi ruuhkassa n. 5 km/h	Yliarvioi matkanopeuden ruuhkassa n. 5 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin ruuhkassa, vapaassa tilanteessa aliarvioi hieman, kohinaa	Yliarvioi matkanopeuden ruuhkassa n. 5 km/h	Erityisesti liittymät ruuhkautuneet
Kesäliikenteen iltaruuhka	Yliarvioi matkanopeutta hieman n. 2 km/h	Yliarvioi matkanopeutta n. 3 km/h	Aliarvioi matkanopeutta n. 3 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin ruuhkassa, vapaassa tilanteessa aliarvioi hieman, kohinaa	Tulos ei juurikaan poikkea ilmaisinsijoittelusta 1	Matkanopeus ei ole juurikaan laskenut
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu	Vapaassa tilanteessa hyvä estimaatti, mutta yliarvioi matkanopeutta ruuhkassa n. 10 km/h	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa n. 5 km/h ja aliarvioi ruuhkassa n. 5 km/h	Aliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa n. 2 km/h ja yliarvioi ruuhkassa n. 10 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin lukuunottamatta kohinaa	Vapaassa tilanteessa hyvä estimaatti, mutta yliarvioi matkanopeutta ruuhkassa n. 10 km/h	Ensimmäisen liittymän tilanne oleellinen matkanopeuden kannalta
Rampille poistuvan liikenteen vaihtelu	Aliarvioi matkanopeutta pahimman ruuhkan aikana n. 5 km/h	Yliarvioi matkanopeutta ruuhkassa n. 20 km/h	Yliarvioi matkanopeutta ruuhkassa 5-10 km/h	Yliarvioi matkanopeutta n. 3 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin	Kahden mittauspisteen menetelmä (ilmaisinsijoittelu 1) ei havaitse matkanopeuden alenemaa
Häiriö linkillä keskellä olevan ilmaisimen jälkeen, 45 min tai 2 h	Aliarvioi matkanopeutta häiriötilanteen alussa 10-15 km/h	Havaitsee häiriön aiheuttaman matkanopeuden laskun vasta kun häiriötä on kestänyt n. tunnin. Tällöinkin matkanopeuden estimaatti jää todellista korkeammaksi n. 10 km/h	Havaitsee häiriön aiheuttaman matkanopeuden laskun, kun häiriötä on kestänyt n. puoli tuntia. Tällöinkin matkanopeuden estimaatti jää todellista korkeammaksi n.10 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin	Aliarvioi matkanopeutta häiriötilanteen alussa n. 5 km/h	Ilmaisinsijoittelu vaikuttaa häiriön havaitsemisen nopeuteen sekä hieman liikennevirtamallin estimaattiin
Häiriö linkillä ennen linkin keskellä olevaa ilmaisinta, 45 min tai 2 h	Yliarvioi matkanopeutta 60-70 km/h häiriötilanteessa, häiriön päättyessä nopeusestimaatissa piikkimäinen lasku	Havaitsee häiriön aiheuttaman matkanopeuden laskun vasta kun häiriötä on kestänyt n. puoli tuntia. Tällöinkin matkanopeuden estimaatti jää n. 3 km/h todellista korkeammaksi.	Havaitsee häiriön aiheuttaman matkanopeuden laskun, kun häiriötä on kestänyt n. 15 min. Tämän jälkeen estimoi matkanopeuden kuitenkin hyvin.	Estimoi matkanopeuden hyvin	Aliarvioi matkanopeutta häiriötilanteen alussa ja yliarvioi häiriötilanteen lopussa (n. 5 km/h)	Ilmaisinsijoittelu vaikuttaa häiriön havaitsemisen nopeuteen sekä hieman liikennevirtamallin estimaattiin
Häiriö linkin aloittavassa liittymässä, 45 min	Ei havaitse häiriötä kuin piikkimäisenä nopeuden alenemana häiriön poistuessa	Aliarvioi matkanopeutta n. 30 km/h häiriötilanteen aikana	Yliarvioi matkanopeutta n. 40 km/h häiriötilanteessa	Estimoi matkanopeuden hyvin	Yliarvioi matkanopeutta n 55 km/h häiriötilanteessa	Kaikki mallit epäonnistuvat ilmaisinsijoittelulla 2
Häiriö linkin päättävässä liittymässä, 45 min	Ei havaitse häiriön aiheuttamaa matkanopeuden alenemista	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa n. 4 km/h mutta estimoi nopeuden häiriön aikana oikein	Aliarvioi matkanopeutta sekä vapaassa tilanteessa että häiriön aikana n. 2 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin sekä vapaassa tilanteessa että häiriön aikana	Estimoi matkanopeuden hyvin vapaassa tilanteessa, mutta yliarvioi häiriön aikana n. 5 km/h	Linkin matkanopeudessa vain pieni häiriöstä johtuva alenema
Iltaruuhka, liikennetiheyden alkuarvossa virhe	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	Liikennetiheyden alkuarvon virhe aiheuttaa matkanopeusestimaattiin virhettä etenkin vapaassa liikennetilanteessa	-	

LIIKENNEVIRTAMALLIN JA PISTENOPEUSMENETELMIEN SIMULOINTITULOKSET

paras tulos	huonoin tulos					
Tapaus	Nykytilamalli	Laajennettu nykytilamalli - ilmaisinsijoittelu 1	Laajennettu nykytilamalli - ilmaisinsijoittelu 2	Liikennevirtamalli - ilmaisinsijoittelu 1	Liikennevirtamalli - ilmaisinsijoittelu 2	Huomioita
Iltaruuhka, liikennetiheys arvioitu Ilmaisimien varausasteiden perusteella	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	Yliarvioi matkanopeuden vapaassa tilanteessa ja aliarvioi ruuhkassa	-	Liikennevirtamallin tulos lähellä kahden mittauspisteen menetelmän tulosta
Iltaruuhka, linkin alussa ja lopussa olevissa ilmaisimissa sama virhe%	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Virheen satunnaisuudesta johtuen matkanopeusestimaattiin kertyy virhettä, jonka suuruus ja suunta vaihtelee. Virhe on ruuhkassa vapaata tilannetta pienempi	-	Saman virheprosentin käyttö johtaa satunnaisuuden takia hyvin erilaiseen virheen muodostumiseen
Iltaruuhka, linkin alussa suurempi virhe% kuin linkin lopussa	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Ei juurikaan eroa iltaruuhka- tapauksesta	Matkanopeusestimaattiin kertyy virhettä hyvin nopeasti	-	Samojen virheprosenttien käyttö johtaa satunnaisuuden takia hyvin erilaiseen virheen muodostumiseen
Liikennevirtamallin liikennetiheys-estimaatin korjaaminen	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	ks. iltaruuhka	Molemmat korjaamiseen käytetyt tekniikat onnistuvat korjaamaan suuret virheet	-	
Iltaruuhka, pitkä linkki	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin, mutta yliarvioi nopeutta vapaassa tilanteessa n. 2 km/h	Yliarvioi matkanopeutta n. 2 km/h vapaassa tilanteessa ja ruuhkan aikana n. 5 km/h	Aliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa ja yliarvioi matkanopeutta ruuhkan aikana n. 3 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin ruuhkassa, vapaassa tilanteessa aliarvioi n. 3 km/h, kohinaa	Aliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa hieman ja yliarvioi matkanopeutta ruuhkan aikana hieman, mutta pärjää paremmin kuin kahden mittauspisteen menetelmä	Pitkän linkin tulokset eroavat lyhyemmän linkin tuloksista vain hieman
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu, pitkä linkki	Yliarvioi matkanopeutta sekä vapaassa tilanteessa että ruuhkassa 2-10 km/h	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa n. 3 km/h, mutta estimoi sen varsin hyvin ruuhkassa	Aliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa ja yliarvioi ruuhkassa 3- 5 km/h	Yliarvioi matkanopeutta sekä vapaassa tilanteessa että ruuhkassa n. 2 km/h	Estimoi matkanopeuden oikein vapaassa tilanteessa mutta yliarvioi sitä ruuhkassa 5-10 km/h	
Häiriö linkillä keskellä olevan ilmaisimen jälkeen, 45 min, pitkä linkki	Aliarvioi matkanopeutta 20- 30 km/h häiriötilanteessa	Ei havaitse 45 min häiriön aiheuttamaa matkanopeuden alenemaa	Ei havaitse 45 min häiriön aiheuttamaa matkanopeuden alenemaa	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin, mutta yliarvioi sitä n. 2 km/h häiriötilanteessa	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin, mutta aliarvioi sitä n. 2 km/h häiriötilanteessa	
Häiriö linkillä ennen linkin keskellä olevaa ilmaisinta, 45 min, pitkä linkki	Yliarvioi matkanopeutta 40- 50 km/h häiriötilanteessa	Ei havaitse 45 min häiriön aiheuttamaa matkanopeuden alenemaa	Ei havaitse 45 min häiriön aiheuttamaa matkanopeuden alenemaa	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin, mutta yliarvioi sitä n. 2 km/h häiriötilanteessa	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin, mutta aliarvioi sitä n. 2 km/h häiriötilanteessa	

NEUROVERKKOJEN, PISTENOPEUSMENETELMIEN JA LIIKENNEVIRTAMALLIN SIMULOINTITULOKSET

paras tulos huonoin tulos
Neuroverkkojen ja pistenopeuteen perustuvien menetelmien ja liikennevirtamallin simulointitulokset

Ajo	Yhden mittauspisteen menetelmä	Kahden mittauspisteen menetelmä - ilmaisinsijoittelu 1	Kahden mittauspisteen menetelmä - ilmaisinsijoittelu 2	Neuroverkko 1	Neuroverkko 2	Liikennevirtamalli	Huomioita
Ilta ruuhka 2	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa 3-15 km/h ja aliarvioi ruuhkassa n. 3 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin vapaassa tilanteessa, mutta aliarvioi matkanopeutta ruuhkassa 5-10 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin vapaassa tilanteessa, mutta aliarvioi matkanopeutta ruuhkassa (tulos lähellä kahden mittauspisteen menetelmää)	Estimoi matkanopeuden hyvin vapaassa tilanteessa, mutta aliarvioi matkanopeutta ruuhkassa (tulos lähellä kahden mittauspisteen menetelmää)	Estimoi matkanopeuden hyvin molemmilla ilmaisinsijoittelulla	
Kesäliikenteen ilta ruuhka 2	Yliarvioi matkanopeutta n. 2 km/h	Yliarvioi matkanopeutta n. 5 km/h	Yliarvioi matkanopeutta n. 3 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin molemmilla ilmaisinsijoittelulla	Matkanopeus ei ole juurikaan laskenut
Rampilta tulevan liikenteen vaihtelu 2	Estimoi matkanopeuden varsin hyvin vapaassa tilanteessa mutta yliarvioi matkanopeuden ruuhkassa 5-15 km/h	Yliarvioi matkanopeutta etenkin vapaassa liikennetilanteessa n. 5-10 km/h	Yliarvioi matkanopeutta etenkin ruuhkassa n. 5-10 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin ilmaisinsijoittelulla 1 mutta ruuhkassa ongelmia ilmaisinsijoittelulla 2	Ensimmäisen liittymän tilanne oleellinen matkanopeuden kannalta
Häiriö linkillä ennen linkin keskellä olevaa matka-aikamittauspistettä, 45 min	Yliarvioi matkanopeutta häiriön aikana n. 60 km/h. Häiriön poistuessa nopeus alenee pikkimäisesti	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 40 min	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 15 min	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 20 min	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin molemmilla ilmaisinsijoittelulla	Ilmaisinsijoittelu vaikuttaa häiriön havaitsemisen nopeuteen myös neuroverkkomalleilla
Häiriö linkillä keskellä olevan matka-aikamittauspisteen jälkeen, 2 h	Aliarvioi matkanopeutta häiriön alussa 10-15 km/h, mutta estimoi sen muuten varsin hyvin	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. tunnin, yliarvioi matkanopeutta häiriön aikana n. 10 km/h	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 45 min, yliarvioi matkanopeutta häiriön aikana n. 10 km/h	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 10 min, estimaatti heilahtelee häiriön aikana rajusti	Matkanopeusestimaatti myöhästyy häiriön alussa n. 10 min, yliarvioi matkanopeutta häiriön aikana n. 10 km/h	Estimoi matkanopeuden hyvin molemmilla ilmaisinsijoittelulla	Neuroverkko 1 epäonnistui, koska tilanne oli opetusavaruuden ulkopuolella
Häiriö linkin aloittavassa liittymässä, 45 min	Ei havaitse häiriötä kuin pikkimäisenä nopeuden alenemana häiriön poistuessa	Aliarvioi matkanopeutta n. 30 km/h häiriön aikana	Yliarvioi matkanopeutta n. 45 km/h häiriön aikana	Aliarvioi matkanopeutta rajusti häiriön aikana (tulos noudattelee kahden mittauspisteen menetelmän tulosta)	Yliarvioi matkanopeutta häiriön aikana n. 20 km/h, mutta pärjää paremmin kuin kahden mittauspisteen menetelmä	Estimoi matkanopeuden hyvin ilmaisinsijoittelulla 1, mutta ei havaitse ruuhkaa ilmaisinsijoittelulla 2	Neuroverkko 2 antaa paremman tuloksen kuin liikennevirtamalli ilmaisinsijoittelulla 2
Häiriö linkin päättävässä liittymässä, 45 min	Ei havaitse häiriötä	Estimoi matkanopeuden häiriön alkanakin hyvin	Ei havaitse häiriötä	Epäonnistuu häiriön aikana täysin, arvioi matkanopeudeksi noin 120 km/h	Ei havaitse häiriötä	Estimoi matkanopeuden hyvin ilmaisinsijoittelulla 1, mutta ei havaitse ruuhkaa ilmaisinsijoittelulla 2	Neuroverkot epäonnistuvat
Toiselta rampilta tulevan liikenteen vaihtelu 2	Yliarvioi matkanopeutta n. 2 km/h	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa ja aliarvioi ruuhkassa 5-10 km/h	Yliarvioi matkanopeutta vapaassa tilanteessa ja aliarvioi n. 20 km/h ruuhkassa	Estimoi matkanopeuden hyvin	Estimoi matkanopeuden hyvin		Neuroverkot onnistuvat hyvin, vaikka matka-aikamittaus koholla
Ilta ruuhka 2, kaikissa ilmaisimissa sama virhe%	Ei juurikaan eroa ilta ruuhka 2 -tapauksesta	Ei juurikaan eroa ilta ruuhka 2 -tapauksesta	Ei juurikaan eroa ilta ruuhka 2 -tapauksesta	Ei juurikaan eroa ilta ruuhka 2 -tapauksesta	Ei juurikaan eroa ilta ruuhka 2 -tapauksesta		Ilmaisinvirheet eivät juurikaan vaikuta tuloksiin

ISSN 1457-9871
ISBN 951-803-178-9
TIEH 3200848